

MOPU

SISTEMATIZACION DE LOS MEDIOS DE COMPACTACION Y SU CONTROL



Diciembre 1987

SISTEMATIZACION DE LOS MEDIOS DE COMPACTACION Y SU CONTROL

Trabajo realizado por
el Ingeniero de Caminos
D. Jacob Abecasis Hachuel,
como colaborador
de Geocisa,
bajo la dirección de
D. Sandro Rocci Boccaleri
Jefe del Area de Tecnología
de la Dirección General
de Carreteras
del Ministerio de Obras
Públicas y Urbanismo

MOPU
Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo
Edita, Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica.
N.I.P.O.: 151-87-084-1
I.S.B.N.: 84-7433-492-6
D. Legat: AV-422-1987
MIJAN, Artes Gráficas. Avila.

INDICE

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 0. | INTRODUCCION. LA COMPACTACION DE LAS OBRAS DE TIERRA | 11 |
| | 0.1 LA FUNCION DE LA OBRA DE TIERRAS EN CARRETERAS | 14 |
| | 0.2 LOS FINES DE LA COMPACTACION | 15 |
| | 0.3 LOS FACTORES BA- SICOS EN LA COMPACTACION. | 16 |
| | 0.4 EL ESTUDIO DE LA COMPACTA- CION Y DEL CONTROL DE SU EJECUCION | 16 |
| 1. | SECCION PRIMERA. LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION | 17 |
| | 1.1 CARACTERISTICAS DE LAS PARTICULAS SOLIDAS DE UN SUELO | 19 |
| | 1.1.1 Peso específico y forma | 19 |
| | 1.1.2 Granulometría | 20 |
| | 1.1.3 Sensibilidad a la acción de la humedad | 22 |
| | 1.2 LA ESTRUCTURA FISICA DE LOS SUELOS | 26 |
| | 1.2.1 Definiciones y fórmulas | 27 |
| | 1.2.2 Gráficos densi- dad-huecos- humedad | 28 |
| | 1.3 LA CURVA DE COMPACTACION DE UN SUELO | 29 |
| | 1.3.1 Variación del contenido de humedad | 29 |

| | | |
|--------|--|----|
| 1.3.2 | Variación de la energía de compactación | 32 |
| 1.3.3 | Influencia de la naturaleza del suelo | 32 |
| 1.3.4. | Curva de Compactación de referencia | 34 |
| 1.4 | LA COMPACTACION Y LAS CUALIDADES RESISTENTES DEL SUELO | 35 |
| 1.4.1 | La resistencia al esfuerzo cortante. Índice de penetración CBR y resistencia a compresión simple | 36 |
| 1.4.2 | La resistencia a la deformación | 43 |
| 1.5 | PEDRAPLENES. LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION | 44 |

2.

| | | |
|-------|---|----|
| | SECCION SEGUNDA. METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION | 47 |
| 2.1 | EQUIPOS DE COMPACTACION | 50 |
| 2.1.1 | Compactadores estáticos | 51 |
| | — de rodillo liso | |
| | — de rodillo con patas apisonadoras | |
| | — de ruedas neumáticas | |
| 2.1.2 | Compactadores vibratorios | 60 |

| | | |
|-------|---|----|
| | — de rodillo liso (remolcados y autopropulsa- dos) | |
| | — de rodillo con patas apisonadoras (remolcados y autopropul- sados) | |
| | — tándem longitudinal | |
| | — tándem transversal (simple y doble) | |
| | — Mixto (rodillo vibrante y ruedas neumáticas) | |
| 2.1.3 | Compactadores res de pe- queño ta- maño y de tracción manual | 69 |
| | — rodillo vibrante (simple y doble) | |
| | — placa vibrante | |
| | — pisón vi- brante y de percusión | |
| 2.2 | EJECUCION DE LA COMPACTA- CION | 73 |
| 2.2.1 | Humedad de compactación | 74 |
| 2.2.2 | Espesor de tongada | 76 |
| 2.2.3 | Rendimiento de un compactador | 77 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.2.4 | Elección del compactador, según el tipo de material | 81 |
| | — Suelos finos | |
| | — Suelos de grano grueso, con finos | |
| | — Suelos de grano grueso, sin finos | |
| | — Pedraplenes | |

3.

| | | |
|-------|--|----|
| | SECCION TERCERA. EL CONTROL DE COMPACTACION | 85 |
| 3.1 | LOS SISTEMAS DE CONTROL DE LA COMPACTACION | 87 |
| 3.1.1 | Control del «producto terminado» | 88 |
| 3.1.2 | Control del «procedimiento» | 89 |
| 3.1.3 | Sistema mixto | 90 |
| 3.2 | LOS ENSAYOS DE MEDIDA DE LA COMPACTACION | 91 |
| 3.2.1 | Medida del porcentaje de compactación | 92 |
| | — Densidad Proctor de referencia | |
| | — Densidad in situ, método de la arena | |
| | — Densidad in situ, método nuclear | |
| 3.2.2 | Medida de la deformabilidad del suelo | 98 |

| | |
|--|-----|
| — Módulo de deformación | |
| — Deformación al paso de cargas | |
| 3.2.3 Medida de la compactación en pedraplenes | 102 |

| | |
|-----------------|-----|
| APENDICE | 105 |
|-----------------|-----|

| | |
|--|-----|
| A. TABLA DE VALORES DENSIDAD SECA-HUMEDAD DE SATURACION (CURVAS DE SATURACION) | 107 |
| B. TABLA DE CARACTERISTICAS DE COMPACTADORES VIBRATORIOS | 111 |
| C. NORMAS DE REALIZACION DE ENSAYOS PARA LA MEDIDA DE LA COMPACTACION DE SUELOS | 117 |
| D. TEST DE WILCOXON APLICADO AL CONTROL DE COMPACTACION | 137 |
| E. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 143 |

0.

**INTRODUCCION
LA COMPACTACION DE LAS OBRAS DE
TIERRA**

LA COMPACTACION DE LAS OBRAS DE TIERRA

Toda carretera es una obra lineal que puede suponerse constituida por la superposición de tres elementos estructurales (fig. 1): la *obra de tierras*, como explanada final de un desmonte o de un relleno, el *firme* y el *pavimento*.

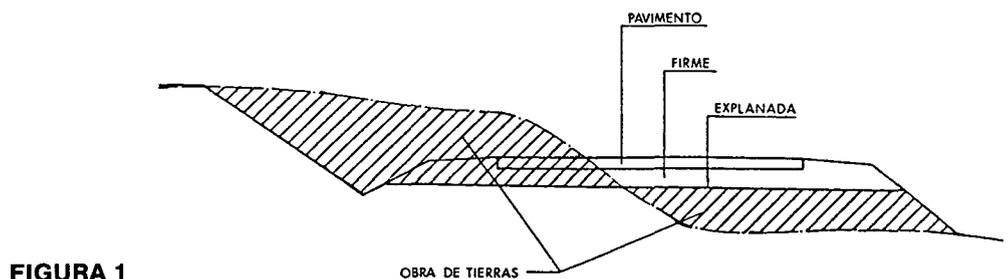


FIGURA 1

Así como el firme o el pavimento pueden faltar —caso de caminos agrícolas o forestales no pavimentados— o estar englobados en un solo elemento —pavimento asfáltico «full depth», por ejemplo— la obra de tierras está siempre presente como elemento bien diferenciado, debido a dos *características* que la distinguen:

a) El firme y el pavimento están constituidos por materiales resultantes de un proceso de selección, combinación de áridos y adición eventual de un conglomerante de tipo rígido o flexible. En la obra de tierras, en cambio, los materiales no han sido sometidos a ninguna alteración previa de sus condiciones naturales y, por tanto, presentan una *heterogeneidad* mucho más acusada.

b) El firme y el pavimento resultan de un cálculo de dimensionamiento y están formados por capas de espesor reducido, de 10 a 30 cm en general. En las obras de tierras, la *ejecución por capas* no tiene más justificación que las propias limitaciones técnicas para poder conseguir la densificación que se desee.

Estas especiales características de las obras de tierras, hacen que su compactación deba ser tratada específicamente, no solo a nivel de los parámetros intrínsecos de los materiales, sino al de los métodos y equipos empleados en su ejecución y control. Bien entendido que algunos aspectos pueden ser también generalizados al caso de firmes y pavimentos.

LA COMPACTACION DE LAS OBRAS DE TIERRA

0.1 La función de la obra de tierras en carreteras.

La obra de tierra en una carretera es la estructura que sirve de soporte a las capas de firme y pavimento, es decir, a aquéllas que reciben directamente las sollicitaciones del tráfico. La *calidad de la explanada* que obtengamos a la terminación, sea de un desmonte o de un relleno, constituye el primer factor determinante del dimensionamiento de cualquier firme. El segundo es la *intensidad del tráfico previsto* durante el período de Proyecto, o número de ejes pesados que en él utilizarán la carretera, y constituye un dato impuesto. La calidad de la explanada se evalúa, en cambio, según su *capacidad portante*, lo que significa que podemos actuar sobre ella, tanto a través de los materiales como a través de la ejecución de la obra de tierras.

Aún cuando las Normas clasifican las explanadas en tres clases E1 - E2 - E3, según la calidad de los materiales constituyentes, la capacidad portante que las define solo se alcanzará si aquéllos reciben la compactación adecuada.

Las Normas 6.1-IC y 6.2-IC, para firmes flexibles y rígidos, respectivamente, ofrecen una o más Secciones-tipo posibles para cada combinación Explanada - Tráfico, y la elección entre ellas obedecerá a criterios técnico-económicos, según la conveniencia de la utilización de unos u otros materiales, o de un sistema u otro de ejecución. Como ejemplo, la presencia de una explanada E2 en lugar de una E3, de calidad superior, supone, en la mayor parte de los casos, suplementar el firme con una capa de 15 cm de sub-base granular, lo cual da idea de la importancia económica de ese descenso de calidad.

En base a lo que antecede, se plantea la cuestión de cuáles deben ser las condiciones a reunir por la obra de tierras, con el fin de conseguir:

- a.—que la explanada alcance *la resistencia o capacidad portante* exigida por las Normas para la sección de firme adoptada.
- b.—que a lo largo del período de Proyecto, no se produzcan *deformaciones* de la carretera debidas a asentamientos de la explanada o a cambios de volumen, por alteraciones de humedad en su seno.

Veamos el papel que le corresponde a la compactación en el logro de esta doble finalidad, exponiendo primero sus fines y, después, los factores básicos de los que depende su ejecución, siguiendo el esquema representado en la fig. 2.

Compactación y calidad de explanada

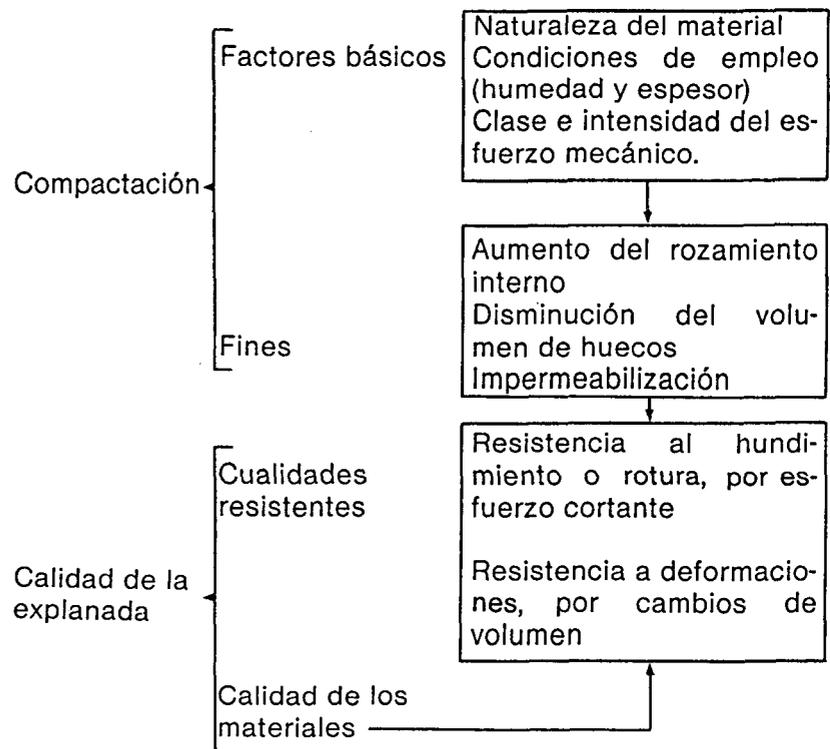


FIGURA 2

0.2 Los fines de la compactación.

La compactación consiste, básicamente, en la densificación de un material por medio de la aplicación de un esfuerzo mecánico. El *aumento del rozamiento interno* entre las partículas sólidas, y la *disminución del volumen de huecos* en la masa del material, son sus dos principales efectos.

A través de su acción, la compactación confiere a la estructura de tierras cualidades resistentes, no solo frente a la presencia de cargas y de su propio peso, sino también frente a las variaciones de humedad en su interior.

Al mismo tiempo, la mayor impermeabilidad, debida a la reducción de los huecos totales, favorece la estabilidad de los taludes y el mantenimiento de las condiciones iniciales de los materiales puestos en obra.

La compactación representa, en la ejecución de la obra de tierras, el último eslabón de una cadena que comprende la extracción del material, de la propia traza o de un préstamo, el transporte al lugar de empleo y el extendido del mismo por capas, con el espesor y humedad adecuados. Solo después

LA COMPACTACION DE LAS OBRAS DE TIERRA

de regularizar la superficie de una capa extendida, entra en juego la fase de compactación.

De todas las operaciones que intervienen en el proceso, la compactación utiliza los medios mecánicos de menor potencia y costo pero, en cambio, ocupa el primer lugar en la incidencia económica que puede derivarse de una mala ejecución. Una ligera disminución en los niveles de compactación, puede arrastrar una drástica reducción en la vida del firme.

0.3 Los factores básicos de la compactación.

La medida en que la compactación pueda alcanzar los objetivos antes señalados, depende de los siguientes factores básicos:

- a.—la *naturaleza del material* integrante de la obra de tierras.
- b.—sus *condiciones de empleo* en obra, en especial la humedad y el espesor de capa.
- c.—la clase e intensidad del *esfuerzo mecánico* aplicado.

Lógicamente, estos tres factores son interdependientes, sin que pueda fijarse ninguno de ellos prescindiendo de los otros dos. Esta correspondencia no es unívoca, y pueden existir distintas combinaciones válidas entre ellos, para cada caso particular de compactación.

0.4 El estudio de la compactación y del control de ejecución.

En primer lugar, es imprescindible pasar revista, a nivel teórico y de pruebas de Laboratorio, a los conceptos fundamentales relativos a la naturaleza de los diversos suelos y sus características de compactación, al efecto de las variaciones de los distintos parámetros que intervienen y a la influencia que tiene la densificación de un suelo en sus cualidades resistentes. De estos aspectos se ocupa sucesivamente, la *Sección Primera*.

La *Sección Segunda* aborda el tema de la diversidad de medios existentes para la aplicación del esfuerzo mecánico de compactación, y su correspondencia con las condiciones de empleo de los distintos materiales, a nivel de ejecución.

La *Sección Tercera*, por último, expone los diferentes métodos aplicables a la medida de la compactación en obra, los criterios de control y sus limitaciones respecto al cumplimiento de las especificaciones.

En cada Sección se hace referencia, por separado, al tema de los pedraplenes, dadas sus peculiaridades, no solo de constitución, sino de ejecución y de control.

El Apéndice recoge la descripción de los ensayos fundamentales, tablas numéricas, relación de maquinaria y, en general, datos cuya inclusión en el texto habrían restado claridad a la exposición.

1.

**SECCION PRIMERA
LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION**

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

Los materiales que constituyen una obra de tierras son, en general, suelos, es decir, materiales naturales compuestos por partículas sólidas formando una estructura en cuyo interior hay huecos ocupados por agua y aire en proporciones variables.

El estudio del comportamiento de estos materiales, en relación a la compactación, requiere considerar los siguientes *aspectos del problema*:

- a.—*Características de las partículas sólidas* del suelo (peso específico, forma, tamaño y distribución granulométrica, sensibilidad a la acción de la humedad).
- b.—*Propiedades de la estructura sólidos-aire-agua*, formada por el suelo en su estado natural, o sometido a compactación (índice de huecos, porosidad, densidad).
- c.—*Influencia de las condiciones de humedad y energía de compactación* en la densidad de una muestra de suelo (curvas densidad-humedad), según la naturaleza del mismo.
- d.—*Influencia de la compactación en las cualidades resistentes del suelo* (resistencia a esfuerzo cortante, módulo de deformación).

1.1 Características de las partículas sólidas de un suelo.

La naturaleza de un suelo y, en consecuencia, gran parte de sus propiedades potenciales, viene determinada por las características de las partículas sólidas que lo componen y, en especial, su *peso específico y forma, la distribución de tamaños o granulometría y su sensibilidad a la acción de la humedad*.

En relación a la compactación, son sin duda las dos últimas características las determinantes del comportamiento del suelo. En cuanto al peso específico, viene fijado por la composición mineralógica del suelo, y su conocimiento es necesario para evaluar la densificación existente en su masa, a través del índice de huecos, como luego veremos.

1.1.1 Peso específico y forma de las partículas

El *peso específico* o peso por unidad de volumen de un suelo es indicativo de la *naturaleza mineral* de sus partículas sólidas. Si éstas están compuestas de minerales pesados, el peso específico puede alcanzar valores superiores a $3,0 \text{ T/m}^3$, mientras que si predominan las partículas de origen orgánico, el suelo tendrá un peso específico inferior a $2,0 \text{ T/m}^3$.

Los suelos de tipo medio, con los cuales se construye la

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

gran mayoría de las obras de tierra, presentan valores comprendidos entre 2,60 y 2,80 T/m³. Su determinación en Laboratorio se hace midiendo el volumen de agua desplazado por las partículas del suelo, previa eliminación cuidadosa del aire encerrado entre las mismas.

El peso específico no constituye, por sí mismo un índice de calidad para la utilización de un suelo en obras de tierra, salvo en el caso ya indicado de un elevado contenido en materia orgánica. Las Normas, por tanto, no suelen contener ninguna limitación relativa al peso específico.

En cuanto a *las características de forma*, se distinguen dos clases de suelos, según sean predominantes las partículas redondeadas o angulosas, o bien las de forma alargada o plana. A los primeros pertenecen las arenas y gravas, de origen rodado o machacado, y a los segundos, algunos suelos procedentes de la evolución de rocas del tipo esquisto o pizarra. En cuanto a los suelos finos, la distinción se establece entre los limos y las arcillas, siendo características de estas últimas la forma alargada de sus partículas de tamaño microscópico.

Las Normas para la ejecución de obras de tierra no suelen contener limitaciones de forma de las partículas más que para el caso de los pedraplenes donde, como veremos más adelante, reviste particular importancia.

1.1.2 Granulometría del suelo

Un suelo contiene, en general, partículas de diversos tamaños, en proporciones variables. Su distribución en porcentajes, la granulometría del suelo, tiene una influencia muy notable en sus propiedades y, en particular, en las relativas a la compactación.

Los límites que separan las diferentes clases de partículas, según su tamaño, son convencionales y varían según la clasificación que se adopte y la finalidad de la misma. Los más comúnmente admitidos son los siguientes:

| | |
|------------------|-------------------|
| Bolos o piedras | Mayor de 80 mm |
| Gravas | 20-80 mm |
| Gravillas | 5-20 mm |
| Arena gruesa | 2-5 mm |
| Arena media | 0,40-2 mm |
| Arena fina | 0,080-0,40 mm |
| Limos y Arcillas | Menor de 0,080 mm |

El tamaño de 0,080 mm (80 micras) es el de la malla de menor abertura con la que es factible realizar con precisión el

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

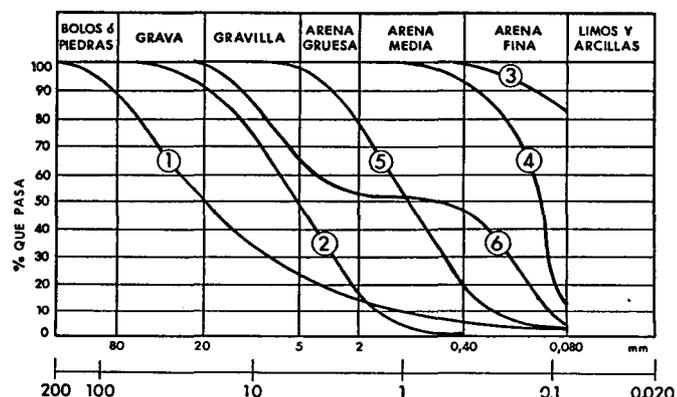
análisis granulométrico por tamizado. Por debajo de ella, la separación entre limos y arcillas ha de hacerse mediante ensayos de sedimentación, rara vez necesarios en nuestro caso de obras de tierra. Generalmente, la identificación cualitativa entre ambas clases de partículas finas se hace atendiendo a sus propiedades de sensibilidad al agua o ensayos de plasticidad, como se verá más adelante.

En condiciones normales, un suelo no estará formado por una sola de las fracciones antes enumeradas, sino por una mezcla de varias de ellas. Por tanto, para caracterizarlo, es preciso conocer los porcentajes de cada tamaño que está presente en el suelo, recibiendo éste su denominación a partir de la fracción o fracciones que predominan.

La *representación gráfica* se realiza sobre papel semilogarítmico, en el que los tamaños de las partículas se llevan sobre la escala logarítmica y los porcentajes que pasan por las mallas, sobre la escala normal. He aquí algunos ejemplos:

| SUELO Nº | %GRAVA | % GRAVILLA | % ARENA GRUESA | % ARENA MEDIA | % ARENA FINA | % LIMOS Y ARCILLAS |
|----------|--------|------------|----------------|---------------|--------------|--------------------|
| 1 | 40 | 25 | 8 | 10 | 4 | 3 |
| 2 | 8 | 44 | 30 | 10 | - | - |
| 3 | - | - | - | - | 18 | 82 |
| 4 | - | - | - | 7 | 81 | 12 |
| 5 | - | 3 | 19 | 58 | 17 | 3 |
| 6 | - | 35 | 14 | 5 | 39 | 7 |

- (1) Zahorra natural, gradación continua, con pocos finos.
- (2) Grava arenosa, sin finos.
- (3) Suelo fino, limoso o arcilloso, con arena fina.
- (4) Suelo arenoso, de gradación uniforme.
- (5) Arena limpia, de gradación continua.
- (6) Suelo gravo-arenoso, con falta de intermedios.



LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

Un coeficiente que da buena idea de la gradación de tamaños de un suelo, es el llamado *Coefficiente de uniformidad*, relación entre el tamaño de malla por el que pasa el 60 % del suelo y aquél por el que pasa el 10 %. Un coeficiente bajo, por ejemplo inferior a 5, indica un suelo mal graduado, mientras que valores altos corresponden a una gama tendida de tamaños, potencialmente favorables para la densificación del material. En el límite, una granulometría teórica de huecos mínimos, como la curva de Talbot, tiene un coeficiente de uniformidad superior a 200.

Es frecuente, en las obras de tierra, caracterizar el suelo por el porcentaje inferior a 80 micras y por el tamaño máximo de sus partículas, ya que en base a ambos valores, las Normas (PG-3/75) establecen la separación entre las calidades de suelos utilizables por condición de granulometría:

| | Tamaño máximo | Pase por 80 μ máximo |
|----------------------|---------------|--------------------------|
| Suelos tolerables | 75 % <150 mm | — |
| Suelos adecuados | 100 % <100 mm | 35 % |
| Suelos seleccionados | 100 % <80 mm | 25 % |

1.1.3 Sensibilidad a la acción de la humedad.

Se entiende por *contenido de humedad* de un suelo la cantidad de agua que contiene una muestra del mismo, referida al peso seco de la muestra y expresada en tanto por ciento.

Hay que distinguir, en primer lugar, los suelos con elevado porcentaje de *materia orgánica* cuya capacidad de absorción de agua es muy grande, causando su esponjamiento y gran compresibilidad lo que les hace altamente indeseables en toda obra de tierras, siendo prácticamente imposible su compactación.

Existen, por otra parte, ciertos suelos procedentes de rocas metamórficas evolutivas cuya sensibilidad a la acción de la humedad puede no manifestarse inicialmente en su arranque y colocación en la obra de tierras y hacerlo, en cambio, en fase más tardía. Es el caso, por ejemplo, de suelos en los que se produzca la caolinización de sus partículas de naturaleza feldespática.

En los suelos inorgánicos la mayor o menor sensibilidad a la acción de la humedad depende fundamentalmente de la *fracción fina*, en razón de su mayor superficie específica. Dentro de ella el papel principal, a estos efectos, lo desempeña la parte arcillosa.

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

La característica más sobresaliente de las arcillas y que, al parecer, está en el origen de la mayoría de sus propiedades es la de que sus partículas microscópicas tienen forma alargada, escamosa, a diferencia de las partículas redondeadas o angulosas de arenas y limos. La estructura interna de una arcilla formada por la imbricación entre las partículas alargadas, tiene un comportamiento específico frente al agua en los siguientes aspectos: *Variación del contenido de humedad, cambio de volumen, permeabilidad y plasticidad*. Veamos, por este orden, cada uno de ellos.

Variación del contenido de humedad.

El volumen de huecos que se produce en la masa de una arcilla es muy superior al de un suelo arenoso o limoso y de una variabilidad mucho más amplia, por alteración de la estructura interna característica de la arcilla.

En consecuencia, el contenido porcentual de agua, tanto la que se encuentra libre ocupando los huecos como la adherida a las partículas del suelo por fuerzas electroquímicas, puede llegar a valores especialmente altos en los suelos arcillosos, por encima incluso del 40 % de su peso seco.

Cambio de volumen.

Cuando el agua llega a colmar prácticamente los huecos entre las partículas del suelo se produce un fenómeno peculiar de los suelos con estructura arcillosa y es su hinchamiento o entumecimiento. Su magnitud depende del tipo de arcilla, pero puede llegar a valores del orden del 7 % y, en casos extremos, de hasta el 20 % de su volumen.

En suelos arenosos hay también aumento de volumen cuando se incrementa su humedad en estado suelto, pero precisamente desaparece al llegar a la saturación.

Si un suelo arcilloso ha sido compactado en obra con baja humedad debemos comprobar que su hinchamiento potencial, a partir de esa humedad inicial, no será excesivo. Para ello, un ensayo que puede dar información valiosa es el ensayo Lambe, en el cual se mide directamente la presión originada por el entumecimiento de una muestra de suelo compactada, que se lleva a saturación. Dicha presión es un índice de hinchamiento, que nos permite calificar al suelo entre unos límites convencionales, desde no crítico a muy crítico (Proyecto de Norma PNE 7-403).

Las Normas (PG-3/75), limitan la capacidad de hinchamiento de los suelos a utilizar en las capas superiores, previendo la posibilidad de una eventual saturación de los mismos en la obra terminada. Se exige un máximo del 2 % para

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

los suelos adecuados, e hinchamiento nulo para los suelos seleccionados (medidos en el ensayo CBR).

Permeabilidad.

Esta cualidad está relacionada con la dimensión de los huecos en la masa del suelo, más que con su volumen total. Por esta razón, la permeabilidad de un suelo de estructura arcillosa es notablemente inferior a la de otro en el que predominen los limos, y en éste, menor que en un suelo arenoso.

Por ello, en la práctica de las obras, después de una lluvia, los problemas de aireación de un suelo limoso suelen ser más graves que en los arcillosos, debido a la mayor penetración del agua en aquél.

Plasticidad.

Es en las propiedades plásticas donde se manifiesta con mayor claridad la diferente sensibilidad de los suelos frente a la humedad. La cualidad de plasticidad es la que confiere a un suelo la capacidad de soportar deformaciones no reversibles, por esfuerzo cortante, sin romperse.

El intervalo de humedad dentro del cual el suelo tiene un comportamiento plástico, se conoce con el nombre de *Índice de Plasticidad*, IP. Tanto más amplio es este intervalo, cuanto mayor es la presencia de arcillas en el suelo. El límite superior del intervalo o *Límite Líquido* (LL) indica hasta qué grado de humedad el suelo sigue comportándose plásticamente; es función, no sólo de la cantidad, sino del tipo de la arcilla. En cuanto al límite inferior, *Límite Plástico* (LP), en el cual comienza a manifestarse la plasticidad del suelo, tiene escasa variación con el porcentaje de arcilla en el suelo.

El conocimiento del índice de plasticidad de un suelo, permite definir la consistencia que presenta, con cada valor de su contenido de humedad W. Para ello, se define (fig. 3)

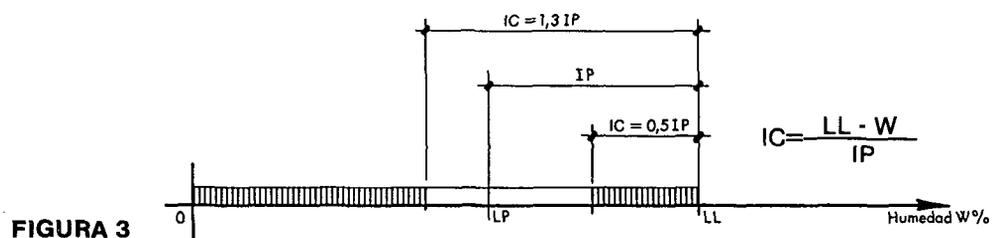


FIGURA 3

el *Índice de Consistencia* IC, que relaciona el intervalo existente hasta el LL, con el IP del suelo. Se considera, como regla práctica, que en las zonas rayadas en la figura, correspondientes a $IC < 0,5$ y a $IC > 1,3$ la compactación del suelo no

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

podrá llevarse a cabo, por exceso y defecto de humedad, respectivamente, sin medidas correctoras especiales.

El conocimiento de los valores del IP y del LL, permite clasificar un suelo desde el punto de vista de su plasticidad. En la representación gráfica de Casagrande (fig. 4), una línea inclinada, *línea A*, empíricamente determinada, separa los suelos limosos de los arcillosos, mientras que la *línea LL = 50* deja a su derecha los suelos de alta plasticidad y muy compresibles. Los suelos que contienen *materia orgánica* se sitúan por debajo de la línea A y suelen tener valores del LP y LL relativamente altos, con lo que el IP puede resultar engañosamente bajo. También la *presencia de carbonatos* en el suelo puede originar un efecto parecido, por lo que debe ser determinada para no interpretar erróneamente los valores de plasticidad.

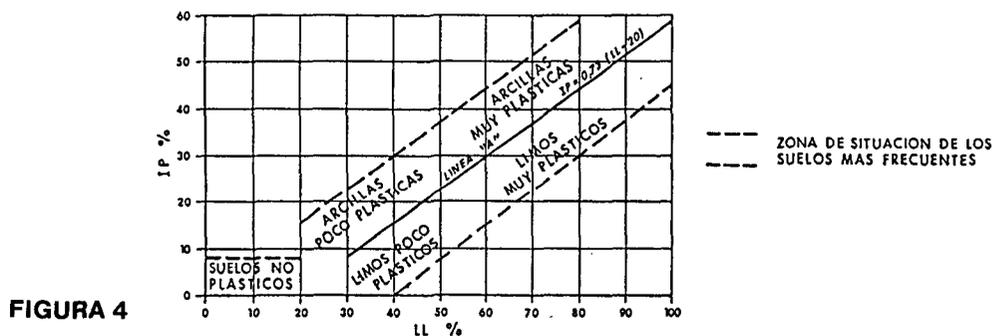


FIGURA 4

La determinación de los Límites líquido y plástico (*Límites de Atterberg*) en Laboratorio, no es fiable para valores del LL inferiores a 20. En los suelos arenosos, con un IP por debajo de 10, la dispersión de los resultados es grande y los valores de los límites pierden significación.

Generalmente esta imprecisión se produce cuando el contenido de finos del suelo, inferiores a las 80 micras, no pasa del 10 ó 12 %. En este caso, aún se puede estimar la proporción de arcillas presente en el suelo, ya que no su plasticidad, a partir del ensayo de *Equivalente de arena*, según el cual, por floculación de los finos en una muestra de la fracción inferior a 5 mm contenida en una probeta, se mide la altura relativa alcanzada por las partículas sedimentadas, no arcillosas. Valores del EA inferiores a 25 ó 30 %, indican una presencia apreciable de arcillas en el suelo.

Un ensayo más reciente, el del *Azul de Metileno*, puede utilizarse en caso de duda para detectar muy rápidamente, por cambio del color, la presencia de arcilla, incluso en muy ligeras proporciones. Hay que señalar, sin embargo, que no es

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

frecuente en obras de tierra la necesidad de discriminar tan bajos contenidos de arcilla en los suelos. La utilidad de estos ensayos está, principalmente, en la calificación de las arenas para su uso en hormigones o capas del firme.

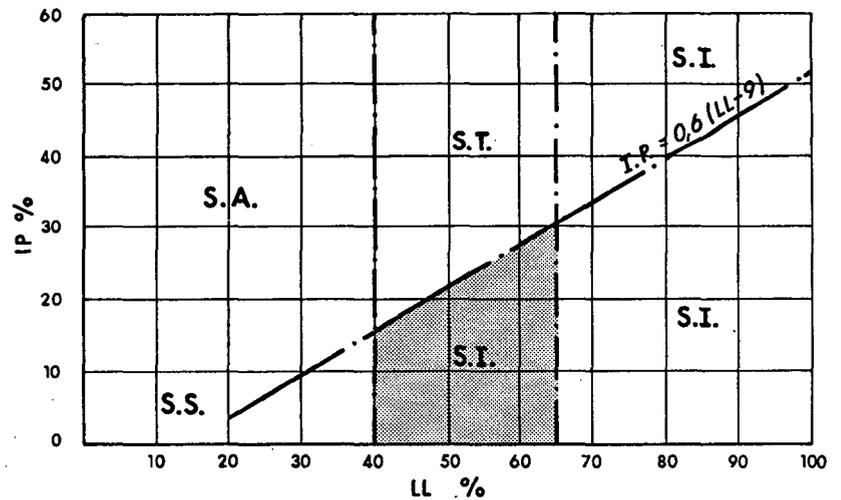


FIGURA 5

S.I. Suelo Inadecuado
S.T. Suelo Tolerable

S.A. Suelo Adecuado
S.S. Suelo Seleccionado

Las Normas (PG-3/75), diferencian las calidades de los suelos, desde el punto de vista de su plasticidad, según unas condiciones que se han resumido gráficamente en la fig. 5. La coronación de la obra de tierra debe estar constituida por suelos del tipo S.A. o S.S. En núcleos y cimientos de rellenos, no inundables, se admite el uso de suelos S.T.

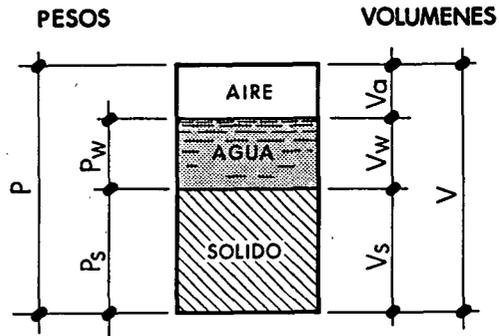
En casos de especial carencia de suelos de mejor calidad, puede estudiarse el empleo, en núcleos y cimientos, de los suelos S.I. situados en la zona oscura de la figura, siempre que cumplan las demás condiciones de las Normas para los S.T. (ver 1.1.2, 1.3.4 y 1.4.1).

1.2 La estructura física de los suelos

La estructura física de un suelo, tanto si se halla en estado suelto o compactado, está constituida por partículas minerales sólidas, entre las cuales existen huecos que pueden estar parcial o totalmente rellenos de agua.

La representación esquemática de esta estructura, descompuesta en sus tres fases «sólidos-aire-agua», es utilizada para establecer los parámetros que caracterizan el estado físico del suelo.

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION



1.2.1 Definiciones y fórmulas

| Parámetros | Definición | Fórmula |
|----------------------|--|-------------------------|
| —Peso específico | $\frac{\text{Peso de sólidos}}{\text{Volumen de sólidos}}$ | $G = P_s / V_s$ |
| —Densidad aparente | $\frac{\text{Peso total}}{\text{Volumen total}}$ | $D = P / V$ |
| —Densidad seca | $\frac{\text{Peso de sólidos}}{\text{Volumen total}}$ | $D_s = P_s / V$ |
| —Humedad | $\frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de sólidos}}$ | $W = P_w / P_s$ |
| —Porosidad | $\frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Volumen total}}$ | $n = (V_a + V_w) / V$ |
| —Índice de huecos | $\frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Volumen de sólidos}}$ | $e = (V_a + V_w) / V_s$ |
| —Huecos de aire | $\frac{\text{Volumen de aire}}{\text{Volumen total}}$ | $n_a = V_a / V$ |
| —Grado de saturación | $\frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen de huecos}}$ | $S = V_w / (V_a + V_w)$ |

La naturaleza del suelo, en cada caso, fija el valor del peso específico medio G de sus partículas sólidas. A partir de este dato básico, y determinando previamente, por alguno de los métodos que más adelante se verán, la densidad seca D_s y la

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

humedad w del suelo considerado, los restantes parámetros característicos se deducen de las propias definiciones, como sigue:

- Densidad aparente $P = P_s + P_w = P_s + w.P_s = P_s(1+w)$. Dividiendo por V , en ambos miembros, resulta

$$D = D_s (1+w) \quad (1)$$
- Porosidad $n = (V_a + V_w) / V = (V - V_s) / V = 1 - V_s / V = 1 - (V_s / P_s) / (V / P_s)$ y, por lo tanto, se tiene

$$n = 1 - D_s / G \quad (2)$$
- Índice de huecos $e = (V_a + V_w) / V_s = (V - V_s) / V_s = V / V_s - 1 = (V / P_s) / (V_s / P_s) - 1$ y, por lo tanto, se tiene

$$e = G / D_s - 1 \quad (3)$$
- Huecos de aire $V = V_a - V_w - V_s = V_a - w.P_s - P_s / G = V_a - P_s(w + 1/G)$. Dividiendo por V , resulta

$$n_a = 1 - D_s(w + 1/G) \quad (4)$$
- Grado de saturación $S = V_w / (V_a + V_w) = V_w / (V - V_s) = V_w / (V - V_s)$. Dividiendo por P_s resulta

$$S = w / (1/D_s - 1/G) \quad (5)$$

1.2.2 Gráficos Densidad - Huecos - Humedad

El conjunto de fórmulas antes deducidas nos permite estudiar gráficamente la variación que experimenta la densidad seca de un suelo, parámetro principal para juzgar su estado de compactación, en función de su contenido de humedad o de su volumen de huecos. Con ello, podremos entrar después en el estudio de la curva de compactación característica de cada suelo, más conocida como curva Proctor.

Densidad seca - Huecos totales.

En el supuesto teórico de ausencia total de huecos en la masa de suelo, su densidad seca coincidiría con el peso específico de las partículas sólidas. A medida que aumente la proporción de huecos, menor será la densidad seca del suelo, según la ley de variación cuya representación gráfica, en función de la porosidad o del índice de huecos, deducida de las fórmulas (2) y (3) es la siguiente (Fig. 6.a):

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

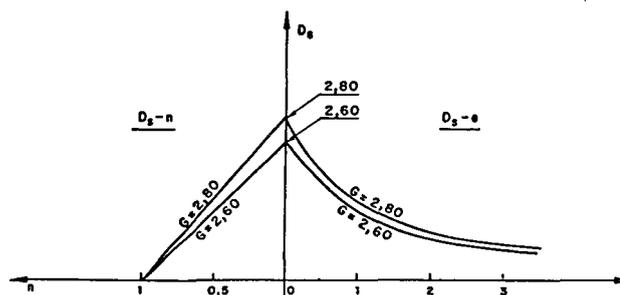


FIGURA 6.a

A igualdad de densidad, el valor del peso específico dentro del intervalo de variación más frecuente en los suelos, tiene escasa influencia en su volumen de huecos. Sin embargo, éste diferirá sensiblemente de un suelo a otro, en función del máximo valor de densidad seca que se pueda obtener en su compactación.

Como ejemplo, suponiendo un peso específico $G = 2,65$, para una densidad seca de $1,60 \text{ T/m}^3$ (suelo de tipo arcilloso), los huecos representan el 65% del volumen sólido y el 40% del volumen total. En cambio, si se obtiene $2,20 \text{ T/m}^3$ (suelo de tipo granular), el volumen de huecos es notablemente inferior, el 20% de la parte sólida, o el 17% del volumen total del suelo, como se deduce de las fórmulas (2) y (3).

Densidad seca - Huecos de aire. La proporción en la cual los huecos totales del suelo están ocupados por agua, viene expresada, bien por el grado de saturación S , bien por el índice de huecos de aire n_a .

Cuando un suelo se encuentre saturado de agua, su densidad seca será función únicamente del contenido de humedad, según la ley:

$$D_s = 1 / (w + 1/G)$$

obtenida haciendo $n_a = 0$ ó $S = 1$ en las fórmulas (4) y (5) deducidas en 1.2.1. Se trata de la denominada *curva de saturación del suelo*.

En la figura 6,b se ha representado las curvas obtenidas al hacer variar en dichas fórmulas los valores de n_a y de S , supuesto un valor de $G = 2,65$.

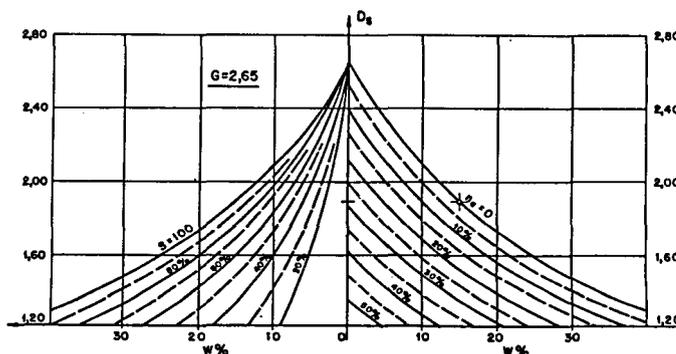


FIGURA 6.b

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

Por medio de estas curvas, conocida la humedad que tiene un suelo, podemos leer directamente la máxima densidad seca alcanzable en su compactación. Por ejemplo, si $w = 15\%$, la D_s máxima teórica será $1,90 \text{ T/m}^3$; en la práctica podemos tomar el 95% de este valor, puesto que nunca se llega a $n_a = 0$. Se trata de un dato de interés a la hora de decidir si nos interesa modificar la humedad del suelo, para conseguir cumplir la especificación de compactación.

Alternativamente, si se conoce la densidad seca y el contenido de humedad de un suelo, podemos leer directamente cuál es su grado de saturación, y, por tanto, el margen de variación que puede sufrir su humedad después de compactado, con el consiguiente efecto en las propiedades resistentes del suelo.

En el Apéndice se ha incluido una tabulación de valores de D_s y w , para diferentes pesos específicos de un suelo en estado de saturación, lo que permite efectuar sin ningún cálculo el dibujo de la curva de saturación.

1.3 La curva de compactación de un suelo

Una vez conocidas las relaciones teóricas que ligan entre sí los valores de *densidad*, *humedad* y *huecos*, en un cierto estado del suelo, se trata de estudiar, ahora experimentalmente, qué ocurre al someter ese suelo a un esfuerzo de compactación.

El experimento básico consiste en introducir una muestra del suelo de humedad conocida, por capas sucesivas, en el interior de un molde cilíndrico de dimensiones fijas, y golpear cada capa con idéntico número de golpes, mediante una maza que cae desde una altura también fija. Finalizada la compactación se determina la densidad seca alcanzada, dividiendo el peso de la muestra, descontado el contenido de humedad, por el volumen conocido del molde.

La evolución que sigue el valor de esta densidad seca, para contenidos variables de humedad de la muestra y diferentes energías de compactación aplicadas sobre ella, constituye el *estudio de compactación* de un suelo en Laboratorio. Vamos a analizar separadamente, a continuación, qué influencia tienen las variaciones de: a) la *humedad del suelo*, b) la *energía aplicada* y c) la *naturaleza del propio suelo*.

1.3.1 Variación del contenido de humedad.

Para estudiar los efectos de esta variación, representamos los valores de densidad seca obtenidos en el experimento an-

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

terior, con humedades progresivamente crecientes, en un gráfico (fig. 7), en el que también se ha dibujado la familia de curvas correspondientes a los distintos porcentajes de huecos de aire en el suelo, incluyendo la curva de saturación $n_a = 0$.

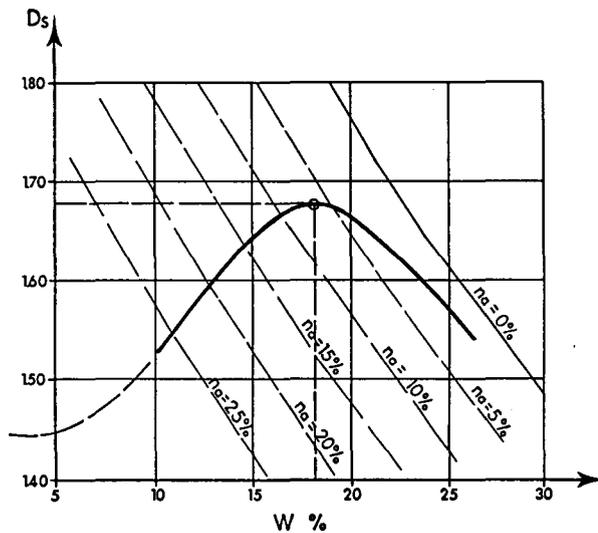


FIGURA 7

El gráfico que resulta tiene forma aproximadamente parabólica, con un máximo más o menos acusado, dependiendo del tipo de suelo.

Al comienzo, para contenidos muy bajos de humedad, las densidades no aumentan e incluso en algunos suelos arcillosos hay una disminución hasta un cierto valor crítico de la humedad, posiblemente debido a la resistencia que oponen los terrones del suelo seco a pulverizarse, hasta que absorben un mínimo de humedad.

Ya en la rama ascendente de la curva, a medida que aumenta la humedad, el valor de n_a va disminuyendo, lo que significa que el aire es expulsado con creciente facilidad. El efecto, en cierto modo lubricante, de reducción de la tensión superficial por el agua añadida, favorece la compactación.

A partir de un cierto contenido de humedad, el valor de n_a se estabiliza y la densidad empieza a decrecer. El aire residual ya no sale fácilmente de los huecos y, en cambio, el agua que se añade a la muestra de suelo desplaza una parte de las partículas sólidas de éste, ocupando su lugar.

Si continuamos el experimento, añadiendo más agua, la curva se aproxima asintóticamente a la curva de saturación del suelo. El agua va sustituyendo gradualmente a la fracción sólida del suelo y, por tanto, la densidad seca sigue en disminución.

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

1.3.2 Variación de la energía de compactación.

Si repetimos el experimento de compactación que acabamos de describir con otra muestra del mismo suelo, pero aplicando una energía más alta, por ejemplo aumentando el número de golpes por capa o el peso de la maza, y comparamos la nueva curva de variación de D_s (fig. 8), con la obtenida en el primer ensayo, se deducen las siguientes diferencias:

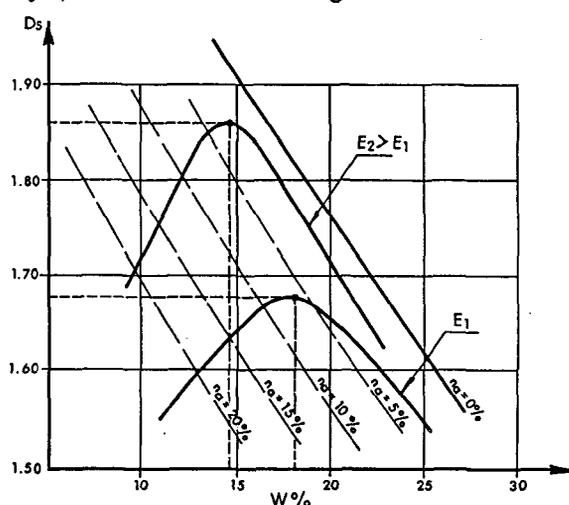


FIGURA 8

- en la *rama creciente* las densidades son notablemente superiores en la segunda curva, aumentando generalmente el margen entre ambas, al crecer la humedad.
- El *máximo de densidad* se produce para una humedad inferior a la correspondiente al máximo de la primera curva. Ambos máximos se encuentran sensiblemente, sobre la misma línea de huecos de aire, en general alrededor de $n_a = 5\%$. Ello significa que, en todo caso, la compactación puede llevar al suelo a aproximarse a su saturación, siendo la energía necesaria para ello tanto más alta cuanto más baja es la humedad.
- Las *ramas decrecientes* de ambas curvas se acercan progresivamente, hasta llegar a confundirse para humedades suficientemente altas. Ello se explica por el hecho antes apuntado, de que se ha llegado en los dos casos a un contenido de aire mínimo que no puede ser expulsado. El incremento de energía lo absorbe el exceso de agua añadida, produciendo el desplazamiento de las partículas del suelo.

1.3.3 Influencia de la naturaleza del suelo.

De entre las características naturales de un suelo, las más significativas a efectos de su compactación, son la

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

composición granulométrica y la sensibilidad al agua de la fracción fina del mismo.

- a) En los suelos con falta de finos —porcentajes inferiores al 5 % de pase por el tamiz de 80 micras— y predominio de tamaños de arenas y gravas, la compactación fuerza el contacto de las partículas gruesas entre sí, pero los huecos entre ellas no se colman, al no haber suficiente material fino para ello. El incremento de humedad tiene, por tanto, escasa influencia y no hace aumentar la densidad seca del suelo. La curva de compactación (fig. 9), tiene un aspecto aplanado, sin un valor definido del máximo de densidad. Este tipo de curva, cuando el suelo es suficientemente permeable, llega a cortar la curva de saturación, lo que significa que el exceso de agua se expulsa del interior de los huecos y la cantidad de sólido por unidad de volumen se mantiene sensiblemente constante.
- b) En los suelos con un porcentaje de finos más alto, sin sobrepasar un 35 % aproximadamente del pase por 80 micras, la distribución de tamaños tiene una incidencia importante en su compactación.

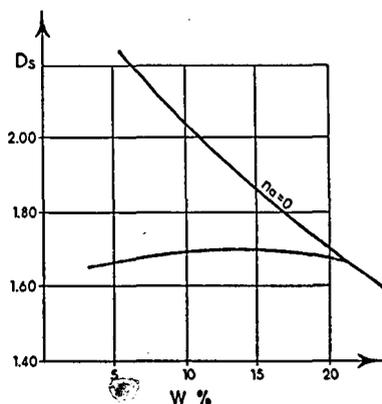


FIGURA 9

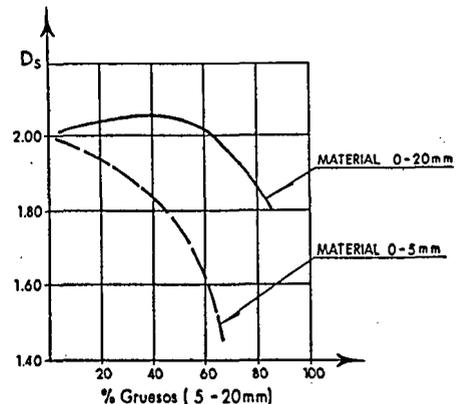


FIGURA 10

Si la mezcla de tamaños que contiene el suelo es de gradación más o menos continua, con un máximo del 10 al 12 % de finos, la compactación se ve favorecida. Los huecos quedan rellenos, si los finos tienen la humedad apropiada, y la curva de compactación presenta un máximo bien definido.

En cambio, si dentro de la matriz de suelo fino, los gruesos aumentan su proporción, pueden llegar a dificultar la densificación del suelo. Se ha podido comprobar que, si a un suelo con granulometría 0-5 mm se añade elementos gruesos de tamaño 5-20 mm en proporciones crecientes, la densidad del conjunto aumenta al principio pero después disminuye (fig. 10), a partir de una proporción de gruesos del 40 al 50 % del total. Los valores pueden ser diferentes según el tipo de

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

suelo, pero el hecho es que la proporción de partículas gruesas favorece la compactación del suelo, hasta un determinado valor, a partir del cual su influencia es negativa.

c) Por último, en los *suelos finos*, aquellos con una proporción de fracción limo-arcillosa superior al 35 %, las cualidades de compactación vienen directamente influenciadas por las propiedades plásticas del suelo. En líneas generales, puede afirmarse que, cuanto más plástico es el suelo, la densidad máxima que se obtiene aplicando una misma energía de compactación, es más baja y la humedad necesaria para ello, más alta. A igualdad de plasticidad, las proporciones relativas de arenas, limos y arcillas presentes en el suelo, son determinantes de su curva de compactación.

| | Arena | Limo | Arcilla | LL | IP |
|-----|-------|------|---------|----|----|
| (1) | 88 | 10 | 2 | 16 | NP |
| (2) | 78 | 15 | 13 | 16 | NP |
| (3) | 73 | 9 | 18 | 22 | 4 |
| (4) | 32 | 33 | 35 | 28 | 9 |
| (5) | 5 | 64 | 31 | 36 | 15 |
| (6) | 5 | 85 | 10 | 26 | 2 |
| (7) | 6 | 22 | 72 | 67 | 40 |
| (8) | 94 | 6 | - | - | NP |

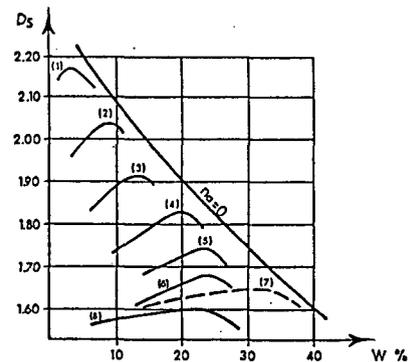


FIGURA 11

El gráfico de la Fig. 11, comparativo de diversos tipos de suelos, desde los arenosos, (1) y (2), hasta francamente arcillosos (7), permite sacar algunas conclusiones interesantes. Los suelos (4) y (5) tienen una proporción de arcilla similar. Sin embargo, el primero alcanza densidades más elevadas, debido a los porcentajes relativos de las fracciones de arenas y limos. Entre los suelos (3) y (6), ambos de una plasticidad muy reducida, el mismo efecto es mucho más patente.

La curva de compactación (7) del suelo de mayor plasticidad, presenta claramente las densidades más bajas del conjunto. Como término de comparación, la curva (8) corresponde a una arena sin finos que muestra la escasa reacción a los incrementos de humedad, en contraste con el máximo más pronunciado en los demás tipos de suelos. Obsérvese la diferencia radical con el suelo (1), también arenoso, pero de granulometría más continua.

1.3.4 Curva de compactación de referencia.

Puesto que la curva de compactación de un suelo, según

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

hemos visto, depende de la energía aplicada, es necesario definir una curva de referencia característica del mismo, a la cual referir cualquier estado de densidad-humedad de dicho suelo.

Universalmente se ha adoptado para ello las curvas correspondientes a dos niveles de energía determinados. El primero llamado *Proctor Normal*, y el segundo, de intensidad cuatro veces superior aproximadamente, conocido como *Proctor Modificado*. No hay una relación definida entre los valores de densidad máxima resultantes de su aplicación, aunque puede afirmarse que en los suelos finos es más acusada su diferencia que en los granulares. En cuanto a la humedad óptima es, lógicamente, inferior en el Proctor Modificado. En el Apéndice se incluyen las Normas vigentes para ambos ensayos de compactación.

Las Normas (PG.3/75) fijan como límites inferiores de la densidad máxima Proctor Normal, según la calidad del suelo, 1.45 T/m^3 para los suelos tolerables, y $1,75 \text{ T/m}^3$ para los suelos adecuados y seleccionados.

1.4 La compactación y las cualidades resistentes del suelo.

Las cualidades resistentes fundamentales de un suelo, como elemento de la obra de tierras, y en las cuales la compactación juega un papel de suma importancia, son la *resistencia a la rotura por esfuerzo cortante* y la *resistencia a la deformación bajo carga*. La primera define la capacidad del suelo para soportar las cargas que actúan sobre su superficie y mantener la estabilidad de los taludes, y la segunda para no deformarse en exceso ante las tensiones, considerablemente inferiores a la de rotura, a las que estará sometido en servicio.

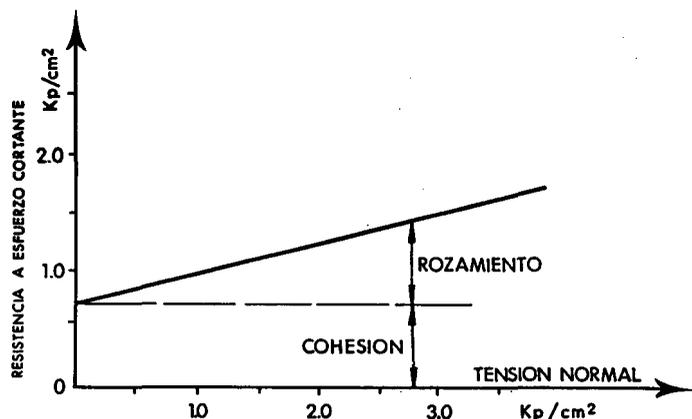


FIGURA 12

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

La *resistencia a esfuerzo cortante* se origina en el suelo por la suma de dos componentes (fig. 12): la *cohesión*, aportada por la fracción fina del suelo, responsable de sus propiedades plásticas, y el *rozamiento interno* entre las partículas granulares. La importancia relativa de uno u otro componente califica, en términos simples, al suelo como más o menos cohesivo.

En cuanto a la *resistencia a la deformación*, cuando el suelo se somete a tensiones verticales crecientes, se produce una relación tensión-deformación (fig. 13), que al principio, tiene forma aproximadamente rectilínea, definiéndose un *módulo de deformación*, por analogía con el diagrama de materiales como el acero o el hormigón. El suelo también se comporta elásticamente, solo que para tensiones muy pequeñas, en términos comparativos.

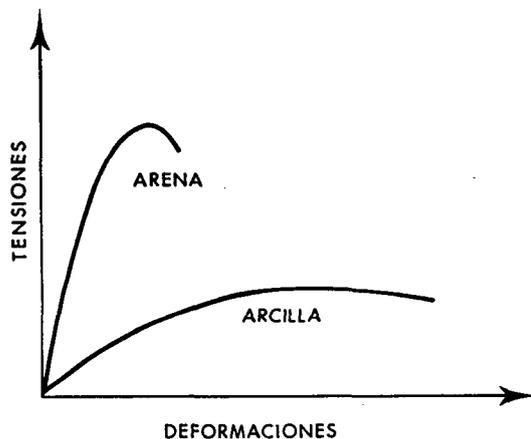


FIGURA 13

De un modo general puede afirmarse que la *resistencia de los suelos*:

- Disminuye al decrecer el tamaño de sus partículas.
- Aumenta al crecer su densidad seca y bajar su contenido de humedad.
- Puede disminuir de forma sensible, en el suelo extendido y compactado, respecto al mismo suelo inalterado, a partir de un cierto contenido de arcilla.

1.4.1 La resistencia al esfuerzo cortante. Índice de penetración CBR, y Resistencia a compresión simple.

La *resistencia a esfuerzo cortante* que, en los estudios de mecánica del suelo, se investiga sobre muestras inalteradas en los ensayos de corte directo o triaxiales, en las obras de

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

tierras para carretera suele determinarse de forma indirecta a partir de un ensayo de penetración, el del índice CBR, que puede ser realizado *in situ* o, más generalmente, sobre muestras moldeadas y compactadas en laboratorio. Menos frecuentemente, la resistencia se determina también mediante el ensayo de rotura a compresión simple.

A) El Índice de penetración CBR.

El ensayo CBR (California Bearing Ratio) mide la carga necesaria para hacer penetrar un pistón de dimensiones determinadas, a velocidad prefijada, en una muestra compactada de suelo, en general después de sumergirla en agua durante cuatro días (fig. 14).

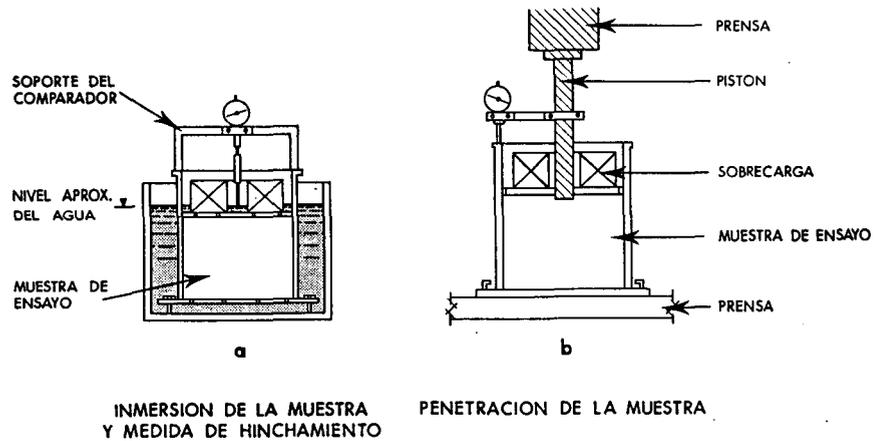


FIGURA 14

La inmersión en agua tiene por objeto prever una posible acumulación de humedad en el suelo después de la construcción.

Después que la muestra ha sido sumergida, antes de proceder a la penetración con el pistón, se registra el hinchamiento que ha experimentado, midiendo el movimiento de un vástago que descansa sobre una placa perforada, colocada sobre la superficie de la muestra. La sobrecarga de unos discos anulares sobre el suelo, viene a simular el peso de las capas que se superpondrán a él en servicio.

Durante el ensayo se registran los valores cargas-penetraciones, dando lugar (fig. 15) a una curva con la concavidad hacia abajo y un tramo inicial rectilíneo. En caso contrario, se corrige como se indica en la figura, desplazando el origen de penetraciones al punto obtenido por prolongación de la recta o tangente de máxima pendiente a la curva.

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

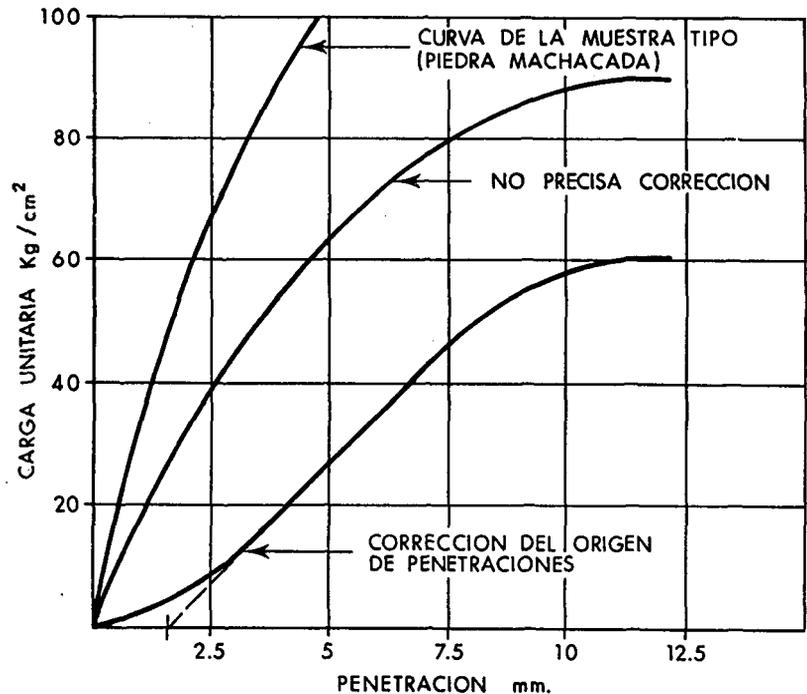


FIGURA 15

El valor de la carga unitaria que resulte para las penetraciones de 2,5 y 5 mm. se expresa en tanto por ciento de la correspondiente a las mismas penetraciones, en el ensayo sobre una muestra tipo de piedra machacada, a la que fue asignado el índice CBR de 100. Se toma como CBR del suelo ensayado el mayor de los dos porcentajes calculados, que generalmente suele ser el que corresponde a los 2,5 mm.

Dada la influencia de la humedad de compactación y de la densidad obtenida en el valor de CBR, como luego se verá, salvo en el caso de suelos claramente no cohesivos, sin finos, el ensayo debe realizarse sobre tres muestras compactadas con el contenido de humedad óptimo y energías diferentes, en general las del P. Normal, P. Modificado y una intermedia. Los tres resultados se trasladan a un gráfico Densidades-CBR, donde se determina el índice CBR que corresponde a la densidad exigida o prevista en obra.

La importancia de la humedad en la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo cohesivo, se pone de manifiesto muy claramente en el gráfico de la figura 16, donde se han representado en correspondencia, la curva de compactación del suelo y la curva de variación del CBR con la humedad en dos supuestos: sin inmersión previa, y después de la inmersión de cuatro días.

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

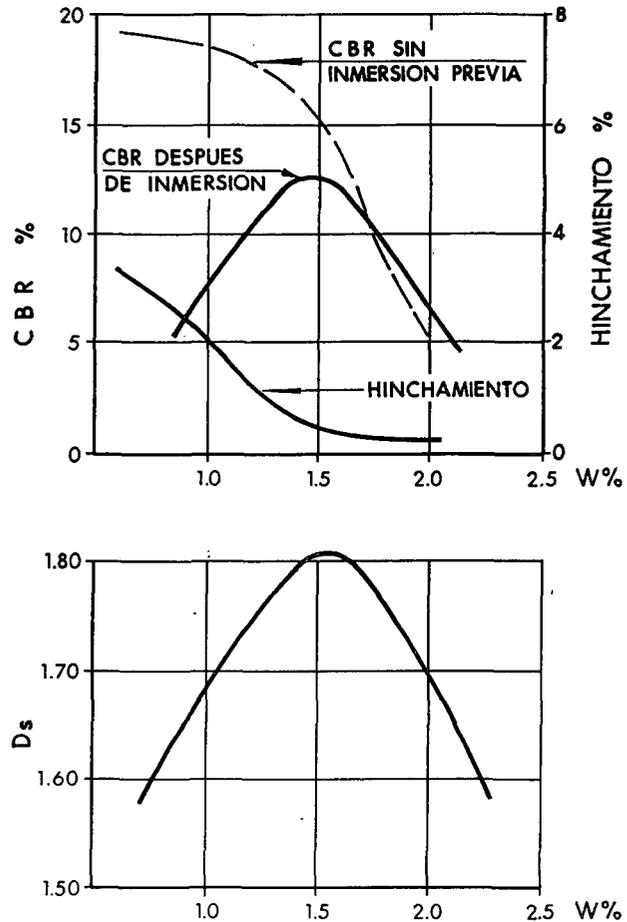


FIGURA 16

En el primer supuesto, se comprueba que el CBR disminuye, a pesar de que la densidad va aumentando, al crecer el contenido de humedad. En cambio, con la muestra sometida a inmersión previa, se produce el efecto contrario: el CBR aumenta hasta llegar a un máximo, para la humedad óptima del suelo. Superado este punto los valores del CBR para ambas muestras son prácticamente los mismos para cualquier humedad. En conclusión, las curvas demuestran que la capacidad portante de un suelo cohesivo seco se reduce muy notablemente, tanto más cuanto más cohesivo, al saturarse de agua. En cambio si su contenido de humedad es relativamente alto, no pierde capacidad portante al aproximarse a la saturación.

Se deduce de lo anterior el riesgo que representa compactar los suelos cohesivos con humedades reducidas, aún cuando se consigan densidades elevadas, ya que después de la construcción pueden sufrir importantes pérdidas de resistencia al crecer su contenido de humedad.

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

La influencia conjunta de la humedad y la densidad del suelo se estudia mediante los gráficos de la figura 17 a) y b) que corresponden al ejemplo de un suelo cohesivo, con $IP = 14$ y $LL = 37$.

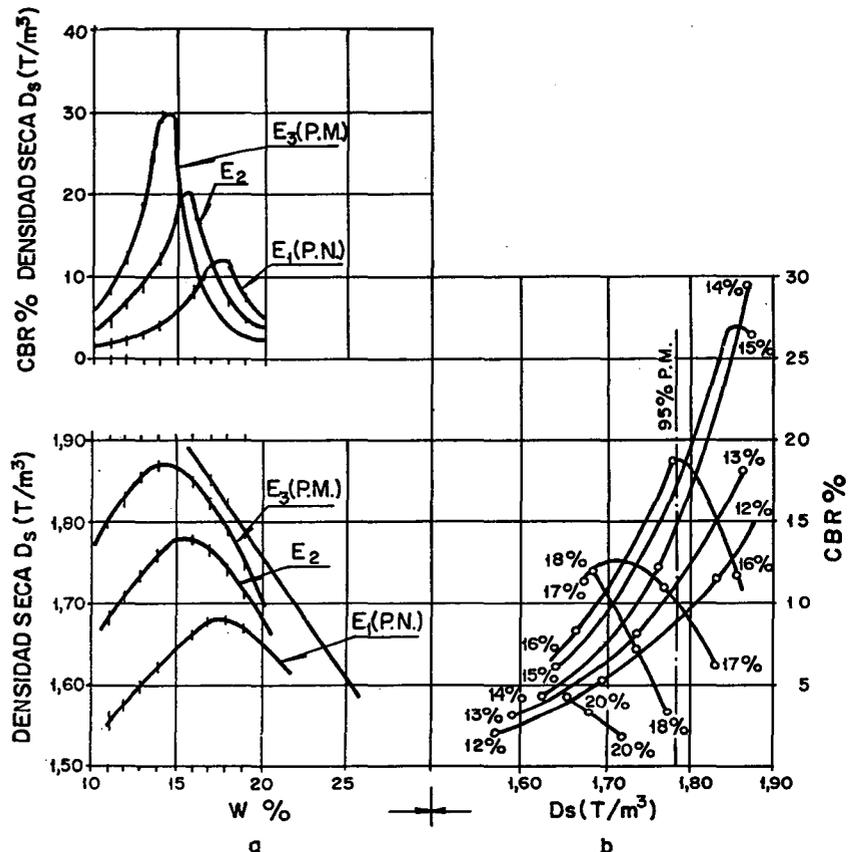


FIGURA 17

A la izquierda (fig. 17.a) se tiene la curva de variación de la densidad seca y del CBR, con el contenido de humedad del suelo, para los tres niveles de energía P.N., P.M. y uno intermedio. A cada valor de la humedad corresponden tres parejas de valores de la densidad y del CBR, respectivamente. Con ellos se construye la familia de curvas del gráfico 17.b, en el cual podemos leer el índice CBR resultante de un determinado estado de densidad y humedad del suelo.

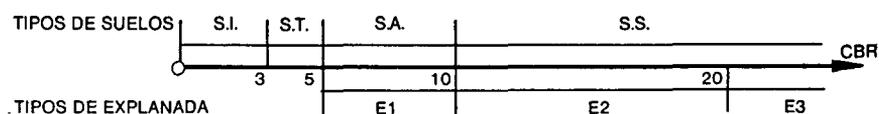
Las curvas demuestran que, para humedades elevadas, a partir del 16 % en el ejemplo, el valor del CBR puede disminuir a pesar de que la densidad del suelo aumente. La causa, como ya sabemos, es la inestabilidad originada por el incremento de la presión del agua en los poros del suelo.

Es importante observar que, con una densidad del 95 % del P.M., como es normal exigir en obra, el CBR del suelo puede oscilar entre márgenes relativamente amplios; según la humedad de compactación. En la figura, para una densidad

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

de $1,79 \text{ T/m}^3$, el CBR puede estar entre 9 y 19, para humedades comprendidas entre el 12 % y 16 %.

Las Normas (PG-3/75) establecen intervalos del índice CBR, que delimitan los tipos de suelo inadecuado, tolerable, adecuado y seleccionado. Al mismo tiempo, las Instrucciones de Firmes (6.1-IC y 6.2-IC) definen las calidades de la explanada, también según su CBR. Estas especificaciones se resumen así:



B) La resistencia a compresión simple. Se trata, en definitiva, de una simplificación del ensayo triaxial, suprimiendo la presión lateral sobre la muestra de suelo. Dadas las condiciones de confinamiento que se dan en la realidad de la obra de tierras, el valor obtenido en el ensayo siempre será conservador.

Las muestras de suelo se preparan compactándolas en el aparato conocido como «Harvard miniatura» (fig. 18), desarrollado en los últimos años. Por regulación de la presión de un vástago que vence la resistencia de un muelle tarado, se puede obtener sobre la muestra cilíndrica de 50 mm de diámetro y unos 100 mm de altura, densidades equivalentes a las del P.N., P.M. u otro nivel deseado, con una acción de impacto combinada con amasado del suelo. Antes de someterlas al ensayo en prensa, las muestras normalmente se sumergen en agua durante cuatro días, determinando después su grado de saturación y el agua absorbida.

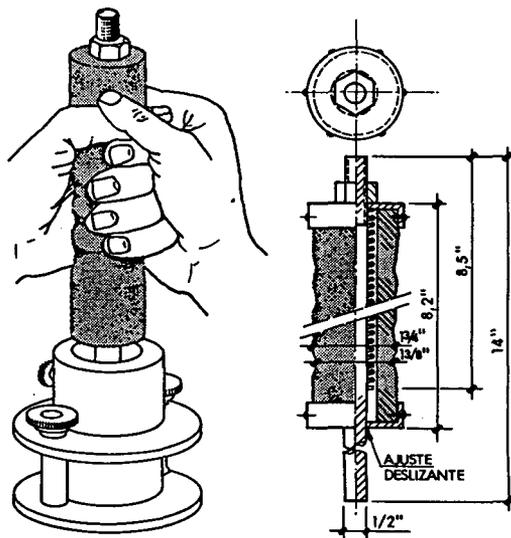


FIGURA 18

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

Durante el ensayo, se registra automáticamente el gráfico carga-deformación. Si la rotura es frágil, se llega a una carga máxima bien definida, rompiéndose la muestra según planos inclinados. Si la rotura es plástica, no se produce una carga máxima sino que se continúa el ensayo hasta que la deformación de la muestra llega a un cierto porcentaje del total, un 20 % generalmente.

La práctica usual de tomar la resistencia a esfuerzo cortante como la mitad de la de rotura a compresión simple, es muy aproximada en suelos cohesivos, y generalmente conservadora en el caso de suelos granulares.

En cuanto a la *influencia del estado de densidad y humedad* del suelo en la resistencia a compresión simple, es en todo similar a la descrita para el Índice CBR. La resistencia aumenta con la densidad seca pero disminuye al crecer la humedad (fig. 19).

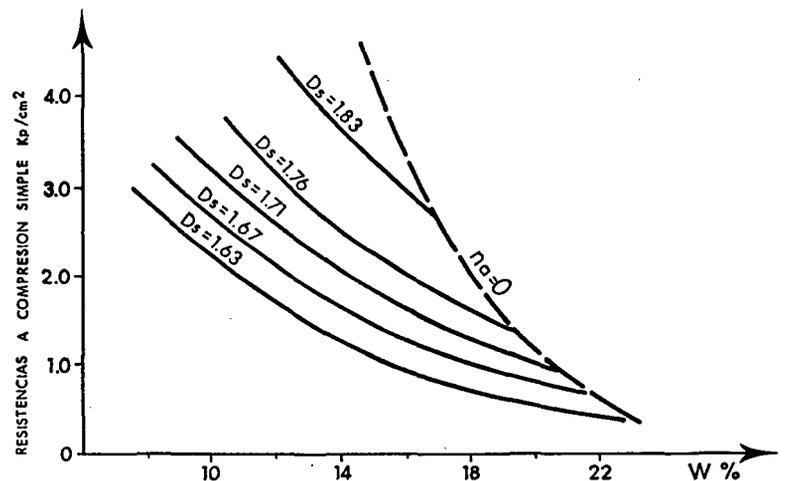


FIGURA 19

Las curvas que representan la resistencia a la rotura por compresión según la variación de la energía de compactación son análogas a las obtenidas para el CBR y las conclusiones lógicamente similares, al tratarse de dos formas distintas de medir la misma resistencia al corte del suelo.

Las Normas no establecen valores de esta resistencia, dados los márgenes de variación, relativamente pequeños, que tiene en las diferentes calidades de suelos. Cuando el ensayo se aplica a suelos estabilizados con cal o cemento, se someten directamente a rotura las muestras extraídas de los moldes de compactación Proctor. En este caso, se fijan los valores de resistencia a la rotura en función de la dosificación de conglomerante.

1.4.2 La resistencia a la deformación.

Hemos visto que los ensayos de penetración y de compresión simple, al actuar sobre un área pequeña de suelo, producen su deformación y rotura esencialmente por esfuerzo cortante. La *resistencia a la deformación por compresibilidad* del suelo, tanto elástica como remanente, ha de medirse mediante un ensayo, no de laboratorio, sino de campo, consistente en cargar una superficie mucho mayor que en los ensayos anteriores, a través de una placa rígida circular que transmite la presión al terreno.

La pendiente de la curva cargas-asientos obtenida en cada ciclo de carga, según el procedimiento operatorio, nos permite calcular el *módulo de deformación* del suelo. La forma típica de la curva en sucesivos ciclos de carga y descarga, (fig. 20), nos muestra cómo el módulo de deformación aumenta progresivamente en cada lazo de histéresis, hasta llegar a un valor de equilibrio. La deformación remanente inicial, que va reduciéndose en cada ciclo, es la debida principalmente a la densificación del suelo bajo la acción de la placa. Cuando llega a anularse, el comportamiento del suelo es elástico en el rango de presiones ejercidas en el ensayo, siempre inferiores a unos 7 kp/cm². En la práctica, no es necesario llegar a más de dos ciclos de carga, como se verá al describir el ensayo en la Sección Tercera.

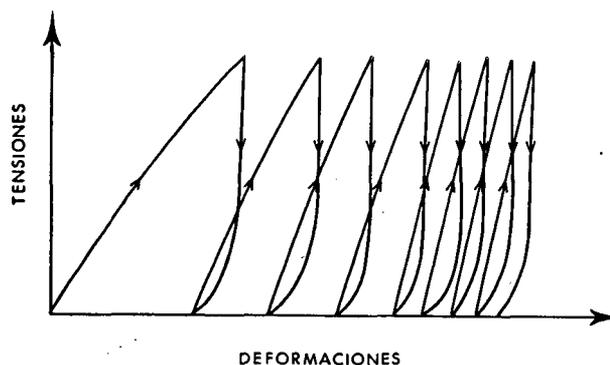


FIGURA 20

Cuanto mayor sea la *densidad seca* de un suelo, más elevado es el módulo de deformación y menor la deformación remanente en el primer ciclo. En cuanto a la *humedad*, su influencia es muy acusada en el caso de un suelo cohesivo, y el valor del módulo resultante es significativo sólo en las condiciones de humedad del ensayo.

Las Normas españolas (PG-3/75), a diferencia de algunas europeas, no fija especificaciones a este respecto. En cuanto a valores orientativos del módulo de deformación, es indispensable referirlos al método operatorio y de cálculo utili-

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

zado. Si se usa el de doble ciclo de carga y descarga, que se describe más adelante (3.2.2), el valor del módulo determinado en el segundo ciclo, en los *suelos de tipo granular*, puede variar de 600 a 1.200 kp/cm², dependiendo de su granulometría, en menor grado de su humedad y sobre todo de su densidad y en los suelos cohesivos desde 250 kp/cm² a 600 kp/cm², en función de sus condiciones plásticas y, muy especialmente, de su contenido de humedad.

1.5 Pedraplenes, los materiales y su compactación

Cuando la explanación de una carretera se lleva a cabo en terreno rocoso hay interés en utilizar, para los rellenos de mayor altura, el material pétreo procedente del escarificado o voladuras de la roca. En cualquier caso el espesor de, al menos, un metro en la coronación del relleno, se reserva para ser ejecutado con suelos en las mismas condiciones de un terraplén normal.

La particularidad fundamental de la compactación de los pedraplenes respecto a la de los suelos consiste en el hecho de que su densificación tiene lugar, ante todo, a través de las *roturas de las aristas de contacto* entre las piedras y el encajamiento de éstas entre sí. En consecuencia, las características de *dureza* y de *forma* de los elementos tienen una gran importancia en los pedraplenes, añadiéndose a las de su gradación granulométrica y la sensibilidad al agua de su fracción fina.

En cuanto a la *característica de dureza*, el problema no consiste tanto en si la roca de origen es blanda o dura, sino en su *evolución con el tiempo*. Es decir, un pedraplén estable se puede construir con piedras duras y sanas, y aún mejor, si tienen una buena gradación de tamaños que facilite el relleno de huecos. También, con una roca degradable, cuyos elementos se desmenuzan con el extendido y la compactación pesada se puede llegar a una estructura estable. Quizá el caso más desfavorable sea la mezcla de piedras de diferente dureza, ya que la densificación de los elementos degradables puede verse dificultada por el contacto entre los más duros.

En cambio, cuando la roca de origen es alterable con el tiempo, en contacto con el aire y la humedad, hay peligro de que forme material fino, a menudo de carácter plástico, y se produzcan deformaciones en el relleno, a pesar de la reducción del volumen de huecos que haya conseguido la compactación. Es muy importante en este caso, por consiguiente, conseguir una estructura en el material lo más cerrada posible, ya que la alteración posterior se verá favorecida si es mayor el volumen de huecos.

LOS MATERIALES Y SU COMPACTACION

El *grado de alterabilidad* de una roca se puede comprobar por dos procedimientos, inmersión en agua o ciclos sucesivos de secado e inmersión. Según el primero de ellos, se califica el comportamiento de una pequeña muestra de roca en 24 horas, al sumergirla en agua, después de su secado en estufa. La muestra puede presentar degradación, rotura rápida o lenta, o no ofrecer ningún cambio. Un ensayo acelerado puede realizarse empleando agua oxigenada.

De acuerdo con el segundo procedimiento, se determina un *índice de alterabilidad*, que viene dado por la relación entre el peso seco de una muestra de pequeños trozos de roca, después y antes de ser sometidos a dos ciclos de agitación en un baño de agua y secado sucesivo.

Por lo que respecta a la *característica de forma*, una proporción elevada de piedras lajosas o aplanadas puede dificultar la reducción del volumen de huecos en la masa del pedraplén mediante su compactación. Las Normas (PG-3/75) limitan aquélla proporción al 30 %, como valor máximo, del total de piedras.

Por último, en cuanto a *gradación de tamaños*, si la piedra contiene material fino en proporción excesiva, con el tiempo este material puede emigrar lentamente hacia los huecos del relleno, provocando su asiento. Las Normas prevén una limitación del 30 % de arena y del 10 % de limos y arcillas.

En definitiva, la *deformación* posterior de un pedraplén compactado tiene su origen en movimientos de encaje de las piedras motivados por tres posibles causas: la *alterabilidad de la roca* y producción de finos con el tiempo, la *alta proporción de elementos planos* o alargados, y, cuando las piedras son duras y sanas, un *porcentaje elevado de arena y finos*. De no existir una de estas causas, el pedraplén compactado por capas puede constituir un excelente apoyo para la coronación de la obra de tierras.

2.

**SECCION SEGUNDA.
METODOS Y EQUIPOS DE
COMPACTACION**

MÉTODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Los métodos de compactación en obras de tierra se basan, fundamentalmente, en hacer circular cargas elevadas sobre una capa de suelo, previamente extendida y nivelada, el número necesario de veces hasta alcanzar la densidad requerida en cada caso. Los medios mecánicos que se utilizan para la aplicación de las cargas son de naturaleza diversa y actúan, en general, por combinación de algunos de los cuatro tipos de esfuerzo que podríamos llamar elementales: *vertical estático, de amasado, de impacto y vibratorio* (fig. 21).

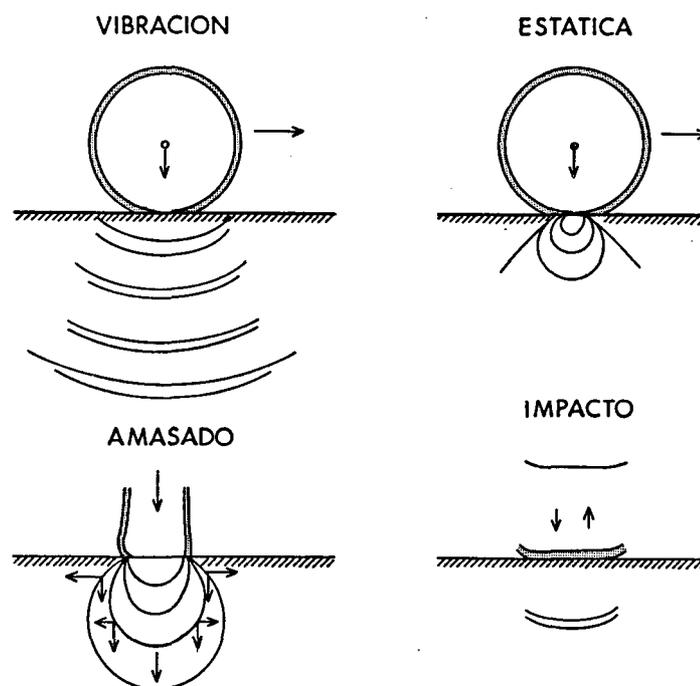


FIGURA 21

Cualquiera que sea el tipo de esfuerzo se observa un *principio general*: las presiones que se transmiten a una determinada cota, son máximas bajo la vertical de aplicación de la carga, y son decrecientes con la profundidad. La diferencia estriba en el sistema de tensiones introducidas en la masa del suelo.

Esfuerzo estático vertical.

Produce bajo la carga circulante tensiones de componente predominantemente vertical que comprimen el suelo.

Esfuerzo de amasado.

Las tensiones se producen al menos en dos direcciones diferentes en sucesivos ciclos, obligando al suelo a deformarse en más de una dirección.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Esfuerzo de impacto.

Produce una onda de presión que se propaga hacia abajo, transmitiendo un cierto movimiento a las partículas del suelo, y alcanzando mayor profundidad que el simple esfuerzo estático.

Esfuerzo vibratorio.

Produce una rápida sucesión de impactos y, por tanto, de ondas de presión que se propagan en profundidad, a una frecuencia que es variable entre límites amplios, pero siempre muy elevados, desde 10 a más de 80 vibraciones por segundo. El movimiento que imprimen las ondas de presión a las partículas del suelo reducen instantáneamente el rozamiento interno en su masa, facilitando así el relleno de huecos y, por tanto, la densificación.

Como es evidente, el esfuerzo estático está siempre presente en toda máquina de compactación, por acción del propio peso de la misma. Sin embargo, su participación en el resultado final del trabajo tiene diferente significación, dependiendo de la clase de máquina de que se trate.

Por otra parte, la aplicación de un determinado esfuerzo de compactación no producirá siempre los mismos efectos, sino que éstos serán *función de la naturaleza y humedad* del suelo en cada caso, así como del *espesor* de la capa a compactar.

En consecuencia, el análisis de los métodos y equipos de compactación de suelos debe cubrir necesariamente *dos aspectos*:

- a.—*Características y clasificación* de las máquinas usualmente empleadas, en las obras de tierra de carreteras, para este fin.
- b.—*Ejecución de la compactación* por el procedimiento más adecuado en función de la naturaleza, humedad y espesor del material en cada caso.

Veamos cada uno de estos dos aspectos por separado.

2.1 Equipos de compactación

En principio, y dejando a un lado los pequeños compactadores de tracción manual, que serán tratados aparte, pueden considerarse los siguientes grandes grupos de máquinas de compactación:

- A.—*Compactadores estáticos*:
 - de rodillo liso
 - de rodillo de patas apisonadoras
 - de ruedas neumáticas.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

B.—Compactadores vibratorios:
de rodillo liso
de rodillo de patas apisonadoras
mixtos (rodillo vibrante y ruedas neumáticas).

Aún cuando los estáticos de rodillo liso son de escasa utilización en obras de tierra, se han incluido, dada su importancia en la adopción de formas más evolucionadas de compactadores. El grupo B es el de más extensa aplicación y mayor diversidad de modelos, por lo que las características técnicas de los más usuales en carreteras se han resumido en una Tabla en el Apéndice.

Finalmente cabe citar, como caso especial, los rodillos de rejas, particularmente eficaces para la terminación superficial de explanaciones rocosas.

2.1.1 Compactadores estáticos.

a) Compactadores estáticos de rodillo liso.

Estas máquinas constituyen, probablemente, el más antiguo medio de compactación mecánica. Esta se lleva a cabo mediante cilindros metálicos lisos revestidos de una gruesa chapa de acero. Existen *dos tipos básicos*: triciclo y tándem, ambos autopropulsados; el ciclindro remolcado estático liso no tiene aplicación.

Tipo triciclo.

Consta de un cilindro delantero (fig. 22), en general dividido en dos mitades con giro independiente para facilitar los cambios de dirección y dos cilindros traseros montados en el eje motor, a uno y otro lado del bastidor, disposición esta que les permite la máxima aproximación a muros, bordillos, etc durante la compactación.

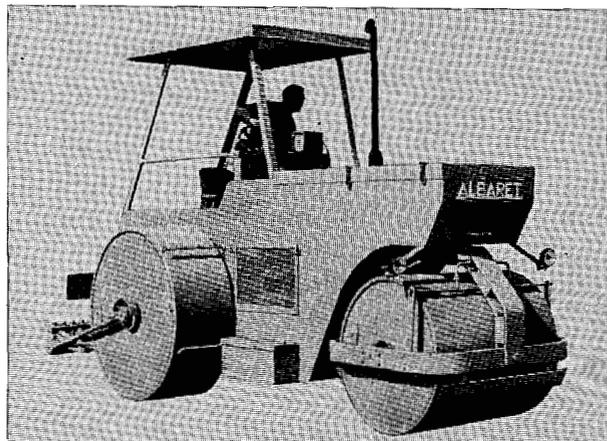


FIGURA 22

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Dimensiones. El ancho total de compactación suele ser próximo a los 2,00 metros. Los rodillos traseros son de un ancho mitad, aproximadamente que el delantero y de un diámetro vez y media mayor. Existe un ligero solape entre las franjas de rodadura traseras y delantera.

Peso y carga unitaria. El peso total puede variar de 8 hasta 20 toneladas, llegándose a cargas unitarias bajo la generatriz de contacto de las ruedas traseras que van desde unos 60 kp/cm hasta 110 kp/cm aproximadamente. Existe algún modelo diseñado para obtener la misma carga unitaria bajo cada uno de los cilindros, los cuales en este caso, son de diámetro semejante y todos ellos de tracción.

Tipo tándem.

Consta de dos cilindros (fig. 23), el delantero de dirección y el trasero, envuelto por el bastidor de la máquina, de tracción. A veces ambos cilindros son motores, lo que elimina el arrollamiento del material por delante y facilita la labor de la máquina en situaciones de mala rodadura.

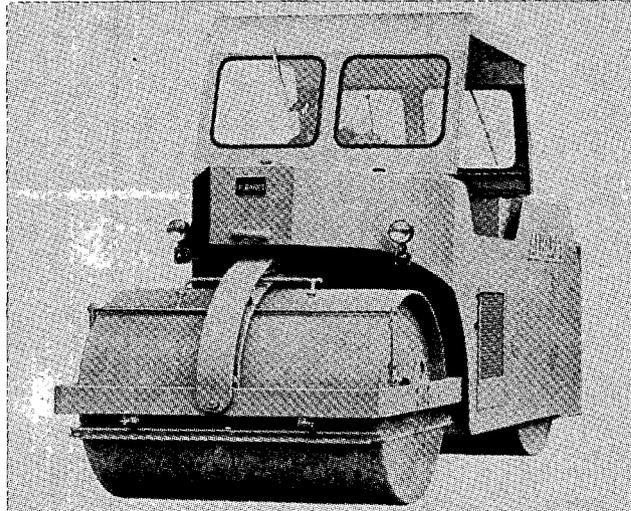


FIGURA 23

Dimensiones. El ancho de compactación no sobrepasa 1,60 metros, en los de mayor tamaño. El cilindro delantero suele tener un diámetro ligeramente inferior al trasero —por ejemplo 1,15 m frente a 1,35 m— mientras que su ancho es algo superior, 1,60 m frente a 1,30 m, en la máquina del mismo ejemplo.

Peso y carga unitaria. El peso total llega a ser de unas 15 toneladas como máximo, regulable mediante lastre dentro del cilindro de dirección, y suele estar distribuido en proporción del 40 % sobre el delantero y el 60 % sobre el rodillo trasero. La carga lineal unitaria bajo este último puede variar desde 30 kp/cm hasta 60 kp/cm en los de mayor peso.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Velocidad. En los compactadores tándem, como en los del tipo triciclo, la velocidad puede variar normalmente, dentro de la gama desde cero hasta 10-12 km/h.

La razón de que los compactadores estáticos de rodillo liso ocupen un lugar muy secundario en las obras de tierra, es doble. Por una parte, las *presiones* transmitidas al terreno, altas en la superficie, *decrecen muy rápidamente con la profundidad*, debido al escaso área de contacto creándose, como resultado, una costra rígida en la superficie al cabo de las primeras pasadas que enmascara la falta de densificación por debajo de ella. Por otra parte, estos compactadores presentan una excesiva *rigidez de funcionamiento* al imponer una carga unitaria lineal constante, por lo general elevada, desde el comienzo hasta el final de la compactación, con independencia de la capacidad resistente que va adquiriendo el suelo.

Todo ello hace que, sólo en contadas ocasiones, se recurra a estos compactadores, como medio complementario para el cierre y alisado de la superficie de una capa de suelo.

b) Compactadores estáticos de rodillo de patas apisonadoras.

En estas máquinas, al cilindro metálico liso se le incorpora un número variable de patas apisonadoras cuya forma, dimensiones y separación entre ellas han ido evolucionando. Con ello se consigue favorecer notablemente el efecto compactador del rodillo; en primer lugar el hundimiento de las patas y por tanto su área de contacto con el suelo, va disminuyendo a medida que avanza la compactación. Ello significa un *aumento progresivo de la presión unitaria* que se transmite al terreno, precisamente cuando su capacidad portante va aumentando.

Por otra parte, estos compactadores combinan al efecto estático de su peso una *acción adicional de amasado y de impacto* que tiene una influencia favorable en la compactación, sobre todo de materiales cohesivos. Ventajas adicionales pueden ser la mayor *aireación* del suelo, en caso de exceso de humedad y, eventualmente, una mejor *trabazón entre las sucesivas tongadas del relleno*.

Morfológicamente hay que distinguir *dos tipos de máquinas*: los clásicos rodillos remolcados de «pata de cabra» y los modernos compactadores autopropulsados de patas apisonadoras («tamping foot» en el mundo anglosajón).

Rodillos estáticos de «pata de cabra».

De uso muy limitado actualmente (fig. 24), estos rodillos

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

fueron adoptando variadas formas de las patas: truncadas, cilíndricas, etc y longitudes de las mismas de 15 hasta 30 cms, buscando una menor resistencia del suelo al avance del rodillo y el máximo efecto en profundidad. Las patas van dispuestas al tresbolillo, en filas de 4 a 6 patas por generatriz, con el fin de facilitar la limpieza del suelo adherido al cilindro.

Dimensiones. El ancho del cilindro puede variar desde 1,20 hasta 1,70 metros y el diámetro entre 1,00 y 1,50 metros, con un número total de patas que oscila de 90 a 130 por rodillo. Remolcados por un tractor de orugas o de neumáticos, es frecuente acoplar dos o más unidades para conseguir el máximo rendimiento.

Peso y carga unitaria. El peso total de los rodillos «pata de cabra» suele ser del orden de 5 toneladas, regulables mediante lastre de arena húmeda o agua. La presión unitaria de contacto se puede determinar dividiendo el peso total, por el producto del número de patas en una fila por el área de contacto de una de ellas. Así se obtienen valores que varían de 1 a 2 MPa (10 a 20 Kp/cm²).

Es más frecuente, dado que el área de contacto de las patas varía a lo largo de la compactación y, por tanto, las presiones no son representativas, denominar a estos rodillos, para su clasificación, por la máxima carga unitaria que pueden transmitir, como si fueran rodillos lisos. Se obtienen valores desde 30 hasta 50 kp/cm de generatriz.

Velocidad. La velocidad de trabajo de los rodillos «pata de cabra» puede variar normalmente de 4 a 10 km/h (65 a 165 m/min).

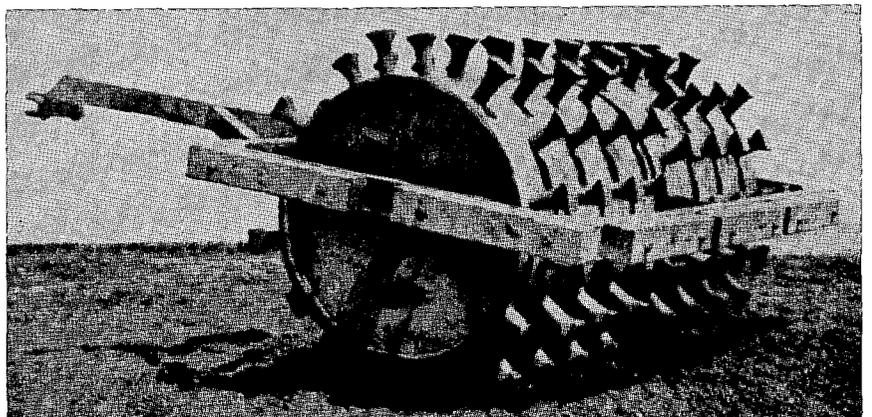


FIGURA 24

Compactadores autopropulsados de patas apisonadoras.

Han representado el avance decisivo en este grupo de máquinas (fig. 25). Cuatro rodillos, dotados de patas que adoptan forma truncada y terminada en doble bisel («tamping foot»),

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

forman el tren de rodaje y de compactación, a la vez, de la máquina.

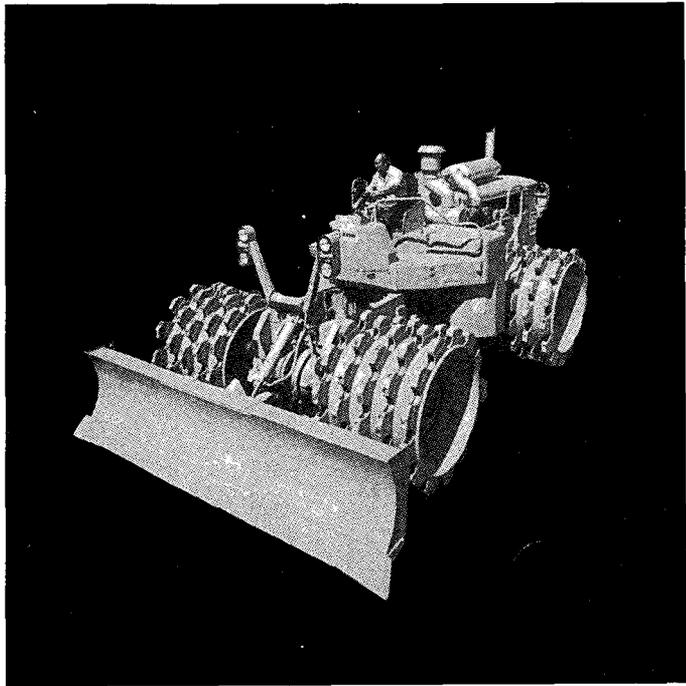


FIGURA 25

Las patas suelen disponerse en diagonal con las generatrices del cilindro, facilitando así la rodadura, y su longitud no supera nunca los 20 cms. Su número total oscila de 50 a 65 por rodillo, repartidas en cinco hileras circulares de 10 a 13 patas.

El eje delantero al que puede acoplarse opcionalmente una hoja empujadora para el extendido del material por delante, es fijo, mientras que el eje trasero, oscilante, permite mantener el contacto continuado con las irregularidades del terreno. La *dirección* se efectúa gracias a una articulación central en el bastidor de la máquina, que permite obtener un ángulo de hasta 45° entre ambos ejes, con un radio de giro mínimo exterior del orden de 6,50 metros.

Dimensiones. El ancho total de máquina puede llegar a ser del orden de 3,50 metros, con un ancho individual de cada uno de los cuatro rodillos individuales de 1,00 a 1,30 metros, y diámetro de la misma magnitud.

Peso y carga unitaria. El peso total se aproxima a las 20 a 30 toneladas, y la carga unitaria lineal bajo cada rodillo, de 50 a 70 kp/cm.

Velocidad. Estos compactadores se conocen con el atributo de «alta velocidad». Disponen de tres, y a veces cuatro, marchas en avance y retroceso, pudiendo alcanzar velocidades máximas del orden de 20-25 km/h.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

c) Compactadores estáticos de ruedas neumáticas.

Se caracterizan por combinar, al esfuerzo vertical de su peso, la *acción de amasado* debida a la deformación de las ruedas neumáticas en contacto con el suelo. La utilización de su propio tren de rodaje para realizar la compactación, confiere a éstas máquinas una indudable ventaja de empleo.

Las ruedas motrices, generalmente situadas en el eje delantero, pueden adaptarse a irregularidades del terreno de hasta 30 y 40 cms gracias a un sistema deformable de balancines y articulaciones en su unión con el bastidor (fig. 26). El segundo eje suele ser rígido y sus ruedas solapan unos centímetros las huellas de las anteriores, consiguiéndose así cubrir todo el ancho de la rodadura.

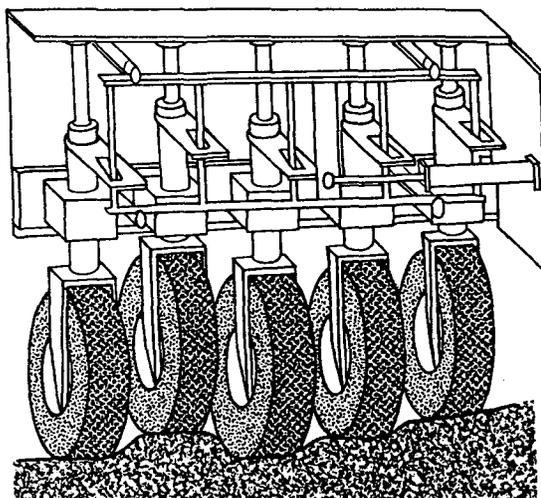


FIGURA 26

El tipo de neumáticos utilizado difiere de unos compactadores a otros, designándose por dos números que indican en centímetros, el ancho y diámetro de la llanta (por ejemplo 11,00X20) y un tercero que es el número de lonas o «ply rating» que compone la cámara.

Carga por rueda, presión de inflado y presión de contacto.

La primera característica de clasificación de estos compactadores es la carga P por rueda. No obstante, es fundamental relacionarla con los dos parámetros de presión: de inflado P_i y de contacto P_c .

La presión P_c es el cociente de la carga P por el área de contacto del neumático, variable esta última con la deformabilidad del suelo soporte. Al aumentar P , también aumenta el área de contacto, con lo que P_c varía en pequeña proporción. Por ejemplo, en un neumático 13,00X24 de 18 lonas, inflado

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

a 7 atmósferas, al doblar la carga, de 1,8 a 3,6 toneladas, la presión de contacto pasa de 0,55 a 0,63 MPa. (5,5 a 6,3 kp/cm²).

La modificación de la *presión de inflado*, en cambio, tiene mayor influencia. Al aumentar, disminuye el área de contacto y se incrementa por tanto, la carga unitaria sobre el terreno. Para el mismo neumático del ejemplo anterior, con una carga de 3,0 toneladas, al crecer la P_i de 4,2 a 7,0 atmósferas, la presión de contacto pasa de 0,46 Mpa a 0,62 Mpa. (4,6 a 6,2 kp/cm²).

Las curvas obtenidas experimentalmente para un neumático 16,00X20Xs Michelin, expresan gráficamente estas relaciones *carga por rueda-presión de contacto* para diferentes presiones de inflado (fig. 27). Cuando estas últimas son bajas, se observa que la presión de contacto es prácticamente la misma para cualquier carga. Hay que señalar que los valores se han obtenido midiendo la huella del neumático sobre una superficie indeformable y, por tanto, son valores teóricos.

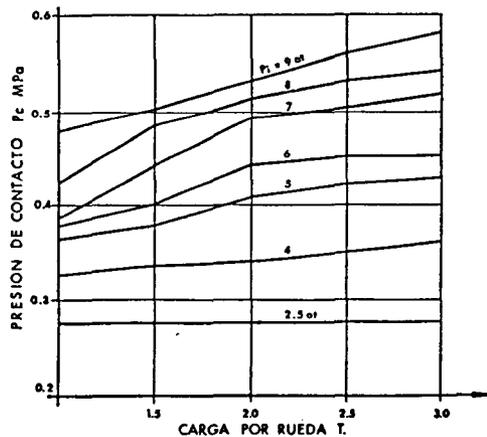


FIGURA 27

La *carga por rueda* es, por otra parte, el factor que más influye en la profundidad a la que llega el esfuerzo de compactación. Al aumentar P y, por consiguiente, el área de contacto, la teoría del bulbo de presiones, aplicada a la acción combinada de los neumáticos situados en un mismo eje (fig. 28), explica que éstas afecten a mayores espesores del suelo.

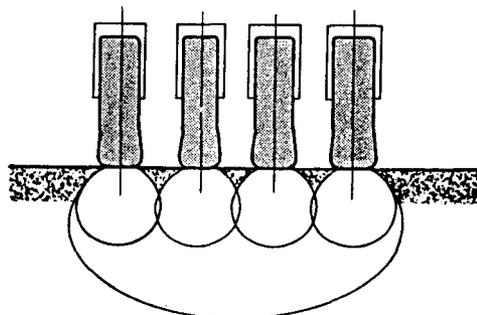


FIGURA 28

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

La *conclusión operativa* que se deduce de las anteriores consideraciones es la siguiente: la máxima compactación *superficial* se consigue subiendo la presión de inflado, mientras que el efecto en *profundidad* aumenta al elevar la carga por rueda y/o el área de contacto de ésta última.

Puesto que la carga no es fácilmente modificable durante el proceso de compactación, es el *área de contacto* la que se incrementa o reduce, a través de la *presión de inflado* regulable en marcha, controlando así, tanto la profundidad de compactación, como la presión transmitida en superficie al terreno.

Morfología. Hay que distinguir, principalmente, los modelos remolcados, entre ellos los supercompactadores, y las máquinas autopropulsadas.

Los *compactadores de neumáticos remolcados*, ya prácticamente en desuso (fig. 29), disponen generalmente de 7 ruedas, en dos ejes de tres más cuatro, y su peso total varía alrededor de las 10 toneladas. La presión de inflado de los neumáticos, por lo general, no supera las 4 atmósferas.

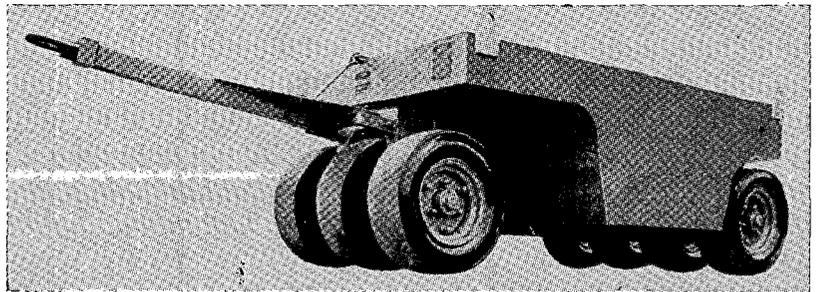


FIGURA 29

Los *supercompactadores* (Fig. 30) constituyen un caso especial dentro de los remolcados. Su peso total puede superar las 50 toneladas, actuando el bastidor de la máquina como un contenedor para el fuerte lastre requerido. Disponen de un solo eje, de dos o cuatro neumáticos de gran tamaño, que se inflan a presiones elevadas, de hasta 10 atmósferas.

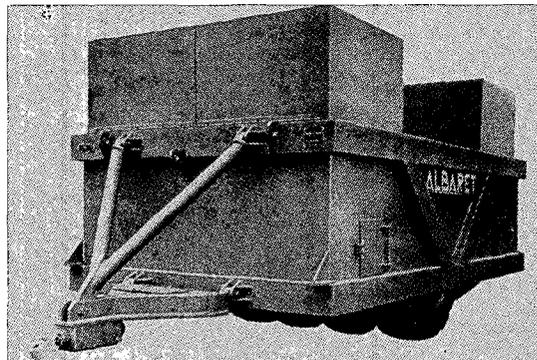


FIGURA 30

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Compactadores de ruedas neumáticas autopropulsados.

Es el tipo más utilizado, debido a su facilidad de maniobra y de desplazamiento. El número de ruedas es variable, (Fig. 31), normalmente siete o nueve, repartidas en dos ejes de tres más cuatro, o cuatro más cinco, respectivamente; el de once ruedas es menos frecuente. Hay también algún modelo con ocho ruedas en dos ejes de cuatro, desfasadas entre sí, como los anteriores, con mejora de estabilidad respecto al de siete ruedas, y del ancho de compactación.

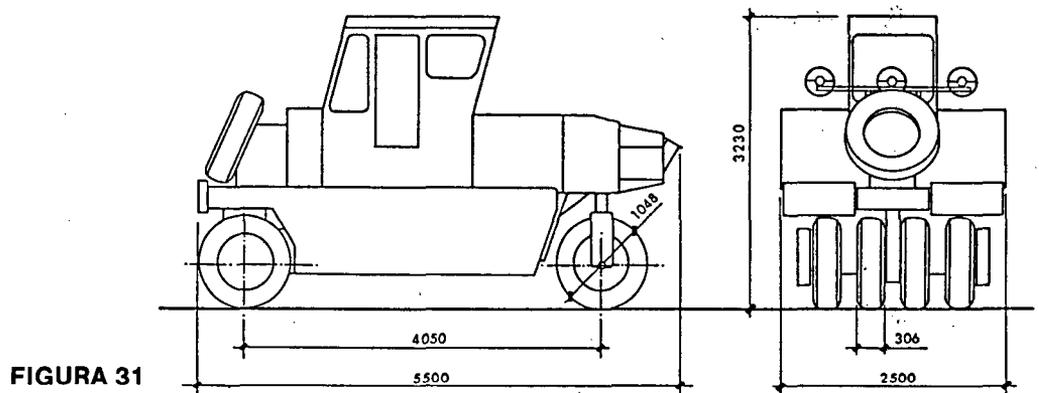


FIGURA 31

Aunque la utilización principal de éstos compactadores se encuentra en las capas de firmes, donde es fundamental la suavidad en los arranques y en la inversión de marchas, también tienen, como veremos más adelante, su campo de aplicación en las obras de tierra.

Dimensiones. El ancho de compactación suele aproximarse a los 2,00 metros y, menos frecuentemente, llega hasta los 2,50 metros. El radio de giro mínimo, interior, puede ser inferior a 5,00 metros. Los neumáticos utilizados, por regla general, son de 7,50 × 15 en los de menor carga por rueda, y de 11,00 × 20 y 13,00 × 24 en los más pesados.

Peso y presiones de inflado. El peso total máximo, junto a la carga por rueda, permite clasificar estos compactadores en tres grupos, de límites convencionalmente definidos: ligeros, hasta 15 toneladas de carga total y 2,5 por rueda; medios, hasta 25 y 4 toneladas, respectivamente, y pesados, hasta 45 toneladas y 6 por rueda. Las cargas superiores a 6 toneladas por rueda son excepcionales y de escaso empleo.

La presión de inflado, generalmente regulable en marcha, suele estar dentro de la gama desde 2,0 a 9,0 atmósferas.

Velocidad. Dada su autosuficiencia para el desplazamiento por carretera, estos compactadores pueden alcanzar

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

velocidades relativamente elevadas, de hasta unos 30 km/h. Su velocidad de trabajo, normalmente es de 6 a 8 km/h, en ambos sentidos de avance.

2.1.2 Compactadores vibratorios.

Caracteriza a este grupo de máquinas la transmisión del esfuerzo de compactación al terreno a través de la *vibración de un cilindro*, originada por el giro excéntrico de una masa en su interior. El cilindro, o *masa vibrante* está unido al bastidor de la máquina o *masa aislada* por acoplamientos elásticos reforzados, que amortiguan la transmisión de las vibraciones.

Antes de entrar en la descripción de los diversos tipos que han resultado de la evolución de estas máquinas, desde su primera aparición en los años 30, es preciso conocer cuáles son los *parámetros* que definen el *movimiento vibratorio* del cilindro considerado libre primero, y después apoyado sobre el suelo.

a) Cilindro vibrante libre.

La masa giratoria m , unida excéntricamente al eje del rodillo, provoca el desplazamiento del centro instantáneo de rotación de éste (fig. 32a) a un punto I y le comunica un movimiento de oscilación o vibratorio.

Amplitud nominal y frecuencia.

Supuesto el cilindro suspendido en el aire, el movimiento oscilatorio tendría una *frecuencia* f igual a la velocidad de giro de la masa m , en ciclos por minuto, y una *amplitud nominal* A_0 , así denominada para distinguirla de la *amplitud real* de trabajo, igual a la distancia OI .

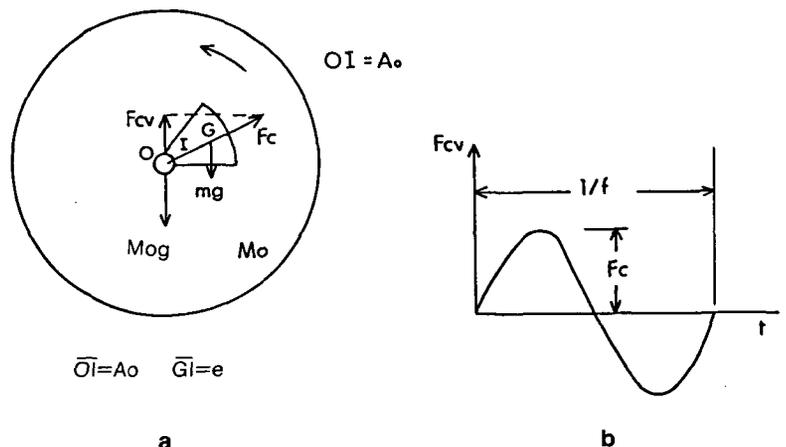


FIGURA 32

a

b

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Las fuerzas que actúan sobre el cilindro, además de su peso propio $M_o.g$, son el peso $m.g$ de la excéntrica, aplicado en su centro de gravedad G a la distancia e del centro de giro del cilindro, y la fuerza centrífuga F_c producida por la masa m al girar. Al tomar momentos respecto al centro resulta:

$$M_o.g.\bar{O}I = m.g.e. \text{ o sea: } \bar{O}I = A_o = m.e./M_o$$

Se deduce, por tanto, que la *amplitud nominal del rodillo* es independiente de su frecuencia de vibración, varía en razón inversa de la *masa del rodillo* y directa del *momento estático* de la masa excéntrica.

b) Cilindro vibrante, apoyado sobre el suelo.

Fuerza total aplicada. La fuerza centrífuga F_c tiene dos componentes: la horizontal, que ejerce una cierta acción sobre el suelo sólo en superficie, y la vertical F_{cv} que es la que actúa predominantemente en la compactación.

La magnitud de F_{cv} varía sinusoidalmente (fig. 32b) en cada ciclo del giro de m , desde cero hasta un valor máximo, que se añade o se resta, según su signo, al peso del cilindro $M_o.g$, para dar lugar a la fuerza total aplicada sobre el suelo. Su valor, en función de $\omega = 2\pi.f$, velocidad angular del giro de m , es: $F_{cv} = m.e.\omega^2$ es decir, proporcional al *momento estático* y al cuadrado de la *frecuencia* de vibración.

Si la diferencia $M_o.g - F_{cv}$ es *positiva*, la fuerza total aplicada es siempre descendente y el rodillo no pierde contacto con el suelo; se dice que trabaja en «acoplamiento». Si es *negativa*, por incrementarse F_{cv} con la frecuencia o el momento estático del cilindro, se produce el «despegue» respecto al suelo, durante una fracción de cada ciclo, y el consiguiente *impacto* a la caída del rodillo (fig. 33 y 34).

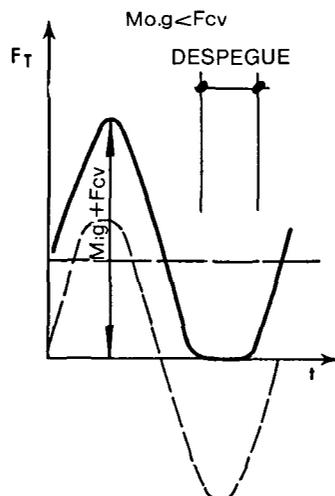


FIGURA 33

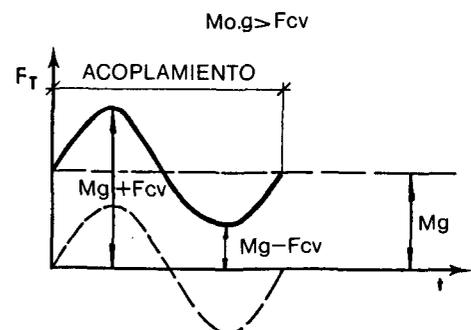


FIGURA 34

Amplitud y frecuencia de trabajo.

La energía que el rodillo transmite al suelo durante la compactación depende, no sólo de la fuerza total aplicada, sino también de la amplitud alcanzada en la oscilación. El valor de esta amplitud está ligado a la frecuencia de vibración, según una ley de variación del tipo representado en la figura 35.

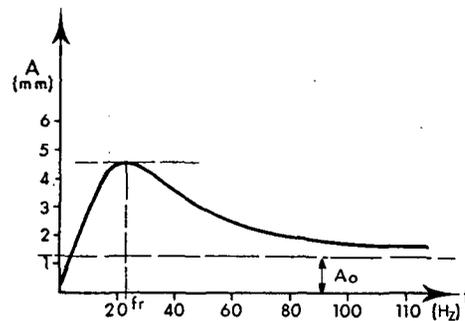


FIGURA 35

La amplitud de vibración crece con la frecuencia, hasta llegar a un máximo para la *frecuencia de resonancia* fr del sistema rodillo-suelo, y después decrece, acercándose asintóticamente, para frecuencias muy elevadas, al valor de la amplitud nominal A_0 del rodillo.

La frecuencia de resonancia, que es más alta cuanto más bajo es el valor de A_0 (fig. 36) depende, entre otros factores, de la propia rigidez del suelo, variable a lo largo de la compactación. En la práctica, la regulación de la energía que se aplica durante el proceso se consigue actuando a la vez sobre los dos parámetros, *frecuencia de vibración y amplitud nominal*. Esta última, como ya se ha dicho, puede modificarse variando proporcionalmente la excentricidad de la masa giratoria y, por tanto, su momento estático.

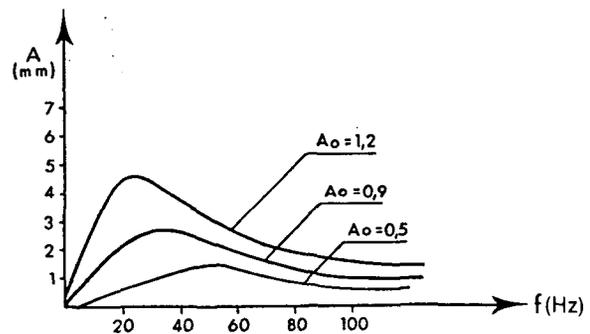


FIGURA 36

Generalmente, los compactadores vibratorios suelen disponer de dos o tres posiciones seleccionables de la masa excentrica y, por tanto, de valores de la A_0 . De esta forma, la

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

compactación vibratoria de una capa de suelo extendida puede desarrollarse según la siguiente pauta:

- en la fase inicial, para obtener una energía moderada, sin impacto, basta emplear el intervalo de frecuencias bajas y la amplitud A_0 más reducida.
- en la fase intermedia, para conseguir la máxima energía, podemos utilizar un valor más alto de A_0 y la frecuencia más conveniente según las características de la máquina. Por ejemplo, si se trata de un rodillo de alta carga lineal unitaria, elegiríamos una frecuencia más moderada que con otro de menor peso.
- en la fase final podemos volver al valor inferior de A_0 , manteniendo una frecuencia elevada y, por tanto, un alto valor de la fuerza total aplicada. Así, las amplitudes serán relativamente reducidas, y obtendremos un nivel de energía suficiente, pero sin impacto, con lo que evitaremos una posible descompactación superficial.

Morfología. La gran flexibilidad de funcionamiento que permiten los compactadores vibratorios, mediante la variación de su energía de trabajo, con y sin impacto, ha ampliado su campo de aplicación en los últimos años, a los más diversos materiales, desde los suelos plásticos a los pedraplenes y a las mezclas asfálticas, dando lugar, por otra parte, a una extensa gama de modelos y tipos de compactadores.

Pueden distinguirse tres grandes grupos: los *monocilíndricos*, del tipo remolcado o autopropulsado, sea con rodillo liso o de patas apisonadoras, los *tándem* y por último los *mixtos*, compuestos por un rodillo vibrante y ruedas neumáticas.

a) Monocilíndricos vibratorios remolcados, de rodillo liso.

Aun bastante utilizados (fig. 37) tienen, junto a la ventaja de que se puede disponer del vehículo tractor para usos alternativos, el grave inconveniente de la dificultad de maniobra y del avance de la máquina en un solo sentido.

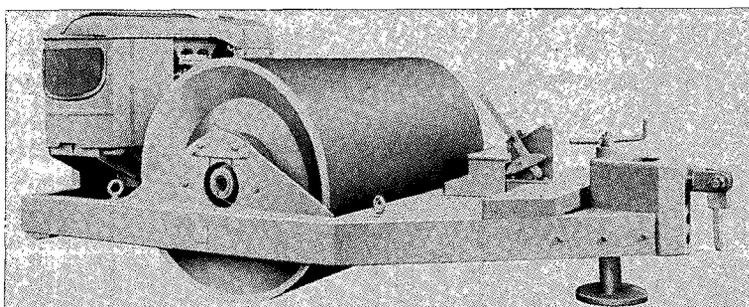


FIGURA 37

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Constan de un bastidor en forma de marco que se apoya en el cilindro, y de cuyas vibraciones está aislado a través de gruesos amortiguadores formados por elementos de caucho. Sobre este marco se dispone el motor que acciona la vibración. El cilindro está envuelto por una gruesa chapa de acero, de 50 mm. de espesor en los más pesados.

Dimensiones. El ancho de trabajo suele ser próximo o ligeramente superior a los 2,00 metros, con diámetro del cilindro de hasta 1,80 metros en los de mayor tamaño. En éstos, la longitud total del bastidor, hasta el punto de enganche al tractor, llega a 5,50 metros.

Peso y carga unitaria. Desde los modelos más pequeños, de unas 3 a 4 toneladas y 20 a 25 kp/cm de carga unitaria, se llega en los modelos mayores, a pesos totales de hasta 15 toneladas y carga lineal unitaria muy elevada, alrededor de los 70 kp/cm, adecuada para trabajos sobre pedraplenes. El vehículo tractor, en este caso sobre orugas, debe tener un peso próximo a las 20 toneladas.

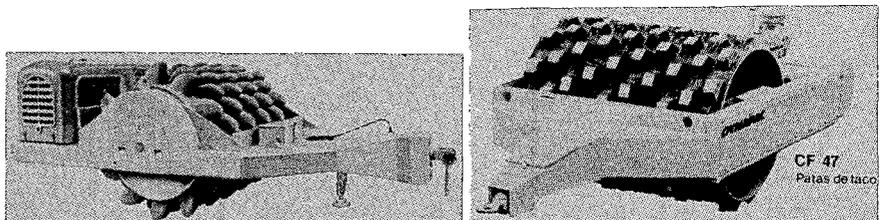
Frecuencias y amplitud de vibración. Son normales, en los de tipo medio y pesado, frecuencias de trabajo entre 25 y 30 Hz (1500 a 1800 cpm) y amplitudes nominales del orden de los 2 mm.

Velocidad. Aunque la velocidad máxima de desplazamiento puede llegar a 10 km/h, la de trabajo suele estar comprendida entre 2,0 y 5,0 km/h (35 a 85 m/min).

b) Monocilíndricos vibratorios remolcados, de patas apisonadoras

Tienen características similares, en cuanto a dimensiones, peso y vibración, a los rodillos lisos remolcados y, de ordinario, pueden montarse sobre el mismo bastidor. Según los tipos, adoptan formas diversas para las patas, con el fin de disminuir el esfuerzo de arrastre (fig. 38).

FIGURA 38



c) Monocilíndricos vibratorios autopropulsados, de rodillo liso

Constituyen el medio de compactación más versátil entre los utilizados hoy en día en las obras de tierra. Teniendo car-

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

gas sobre el cilindro menos elevadas, en general, que los remolcados, eliminan en cambio la rigidez de maniobra y desplazamiento de estos últimos (fig. 39).

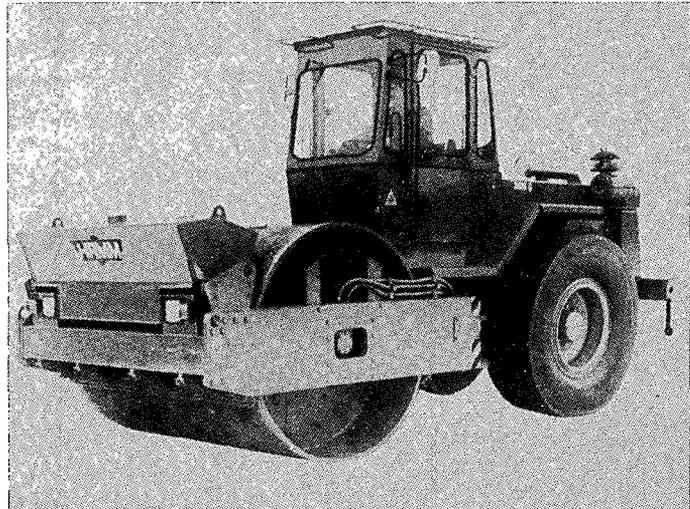


FIGURA 39

El cilindro va montado sobre el eje delantero y el bastidor que lo enmarca va unido por una articulación central, oscilante además en sentido vertical, a la parte trasera de la máquina, lo que le permite un giro relativo de hasta 40-45° con la dirección de avance y 12-15°, en ambos sentidos en vertical. El motor, órganos de dirección y cabina del operador descansan sobre el eje trasero, dotado de dos ruedas con neumáticos estriados de gran agarre.

El radio de giro interior mínimo, gracias a la articulación central, llega a ser inferior a los 3,00 metros en algunos modelos.

Dimensiones. El ancho del rodillo vibrante varía desde 1,70 hasta 2,50 metros, lo que supone un ancho total, comprendido el bastidor, entre 2,00 y 2,80 metros. El diámetro del cilindro varía de 1,30 a 1,50 metros.

Peso y carga unitaria. El peso total de estos compactadores oscila desde unas 8 toneladas, en los de menor peso, hasta un máximo de 18 toneladas en los mayores. Normalmente corresponde un 60 % del peso total al cilindro y el 40 % restante al eje trasero. Así se obtienen cargas unitarias desde 25 hasta algo más de 55 kp/cm de apoyo del cilindro.

Frecuencias y amplitud de vibración. La relación masa aislada/masa vibrante en estos compactadores suele ser inferior a 1, puesto que la mayor parte del bastidor transmite su peso al eje trasero de neumáticos para mejorar la estabilidad y tracción de la máquina. Por tanto, la amplitud en resonancia es relativamente baja, aun cuando se trabaje con rodillos de amplitud nominal elevada.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Normalmente, hay dos intervalos de frecuencia de trabajo: el primero de 25 a 30 Hz (1500 a 1800 cpm) y el segundo de 32 a 38 Hz (1900 a 2300 cpm). Las amplitudes nominales más usuales con estas frecuencias son, respectivamente, de 1,2 a 2,0 mm y de 0,4 a 0,8 mm.

Velocidad. En desplazamiento, los monocilíndricos autopropulsados llegan hasta 20 km/h, mientras que la velocidad de trabajo puede variarse, por lo general, desde cero a 8 km/h en ambos sentidos de marcha.

La tracción se aplica normalmente al eje trasero, aunque es frecuente, en los modelos grandes, convertir el rodillo vibrante también en tractor, lo que incrementa notablemente la potencia de la máquina, pudiendo vencer pendientes del orden del 50 %.

d) Monocilíndricos vibratorios autopropulsados, de patas apisonadoras

Son de constitución similar (fig. 40) a la descrita en los de rodillo liso, pudiéndose intercambiar ambos, normalmente, en la misma máquina. Algunos modelos se equipan opcionalmente con una hoja empujadora para el extendido previo del material.

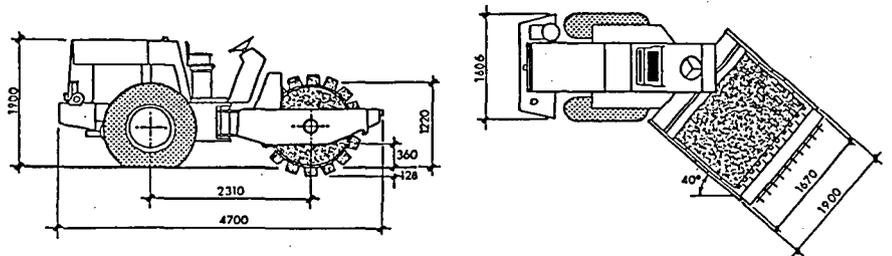


FIGURA 40

Las patas, en número de 130 a 165 por cilindro, se disponen formando V sobre la superficie del mismo para favorecer la rodadura, y adoptan la forma de tacos («pad foot») de 100 mm de altura.

Los datos de *frecuencias*, *amplitudes* y *velocidades* de traslación son en todo semejantes a las correspondientes en las máquinas de rodillo liso.

e) Compactadores vibratorios tipo tándem

A diferencia de los compactadores monocilíndricos, en estas máquinas (fig. 41) todo su peso se suma al esfuerzo de compactación. Constan de dos cilindros montados sobre un bastidor que puede tener articulación central, semejante a la que caracteriza a los monocilíndricos autopropulsados, o bien puede ser rígido, en cuyo caso la dirección, aplicada a ambos

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

rodillos, con giro independiente, es del tipo llamado «cangrejo» (fig. 42), permitiendo el desplazamiento relativo entre ellos.

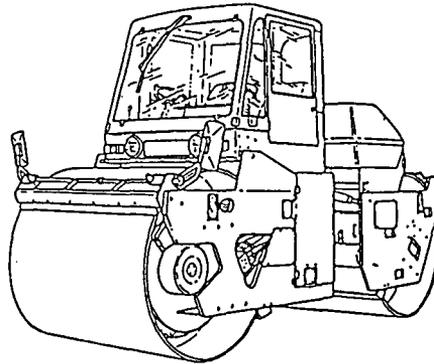


FIGURA 41

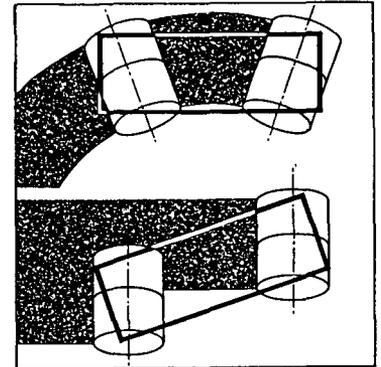


FIGURA 42

El esfuerzo tractor y la vibración se aplica, según el modelo de la máquina, sólo a uno de los cilindros o a ambos a la vez, mejorando la eficacia del compactador. El radio de giro mínimo interior puede ser del orden de 3,00 m cuando el peso no supera las 3 toneladas y de 4,00 a 5,00 m en los de mayor peso.

Los compactadores tándem, más adaptados, debido su desplazamiento sobre cilindros metálicos, a superficies planas y uniformes, tienen mayor aplicación en la compactación de capas de firmes que en las obras de tierra.

Dimensiones. El ancho de trabajo de estos compactadores abarca una amplia gama, desde 0,60 ó 0,80 m en los más ligeros, hasta 1,80 m y más excepcionalmente 2,10 m en los de más peso. El diámetro de los cilindros, desde 0,60 m llega como máximo a 1,30 m.

Peso y carga unitaria. El peso total más frecuente oscila de 6 a 9 toneladas; la gama de los más ligeros comprende los de 2 a 4 toneladas, y el de máximo peso, algo más de 10 toneladas. El peso se reparte aproximadamente por igual entre los dos cilindros; cuando uno de ellos no es tractor, se adapta para admitir lastre.

La carga unitaria lineal, bajo el cilindro de mayor peso, llega a unos 30 kp/cm siendo la más frecuente de 15 a 25 kp/cm.

Frecuencias y amplitud de vibración. En los compactadores tándem, la masa aislada es notablemente mayor que la vibrante, a fin de mejorar el aislamiento de las vibraciones entre los cilindros y el cuerpo de la máquina. Debido a ello se pueden producir amplitudes en resonancia excesivamente elevadas y, por tanto, debe trabajarse con valores reducidos de A_0 para reducir ese riesgo.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Los valores normales de la frecuencia de trabajo son altos, de 50 a 55 Hz (3.000 a 3.300 cpm), aunque en algunos modelos, se dispone también de un intervalo inferior, de 30 a 40 Hz (1.800 a 2.500 cpm). Las amplitudes nominales suelen estar comprendidas entre 0,3 y 0,8 mm.

Velocidad. Los compactadores tándem disponen de regulación en régimen continuo de la velocidad, entre cero y 10-13 km/h. En obras de tierra su velocidad de trabajo no debe superar los 4 km/h (65 m/min).

f) Compactadores tándem transversal, simple y doble.

Son dos variantes del anterior, o tándem longitudinal, actualmente poco utilizados.

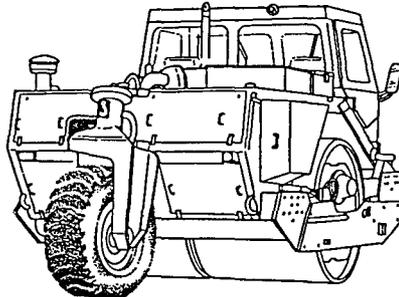


FIGURA 43



FIGURA 44

En el modelo *transversal simple* (fig. 43), los dos cilindros se montan alineados en el eje motor delantero, con giro independiente en cada uno de ellos, realizándose los cambios de dirección por diferencia de velocidad entre ambos. El eje trasero lleva una única rueda central de apoyo. La vibración se transmite por un mecanismo único a ambos rodillos delanteros, los cuales soportan, al mismo tiempo, la tracción de la máquina.

En el tándem *transversal doble* (fig. 44), se sustituye la única rueda neumática por otro eje análogo al delantero, equipado con dos rodillos vibrantes, con la particularidad de que la vibración en ambos está accionada sincrónicamente con un desfase de 180° entre sus masas giratorias y, por tanto, entre las fuerzas centrífugas que actúan sobre cada eje.

g) Compactadores mixtos de neumáticos y cilindro vibrante.

Son máquinas dirigidas, fundamentalmente (fig. 45), a la utilización de la vibración en la compactación de las mezclas asfálticas, pero que pueden también tener aplicación en obras de tierra, al combinar el efecto en profundidad del cilindro vibrante con la densificación y cierre superficial producido por el eje trasero de ruedas neumáticas.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION



FIGURA 45

El bastidor suele llevar articulación central entre ambas partes de la máquina, pero también existe el bastidor rígido, con la dirección aplicada a ambos ejes, del tipo «cangrejo», mencionado en los tándem.

Generalmente, la tracción se aplica, tanto al cilindro vibrante, como al eje trasero de tres o cuatro ruedas neumáticas.

Dimensiones. El ancho de compactación más frecuente es del orden de 1,70 metros, existiendo, más excepcionalmente, el de 2,30 metros. El diámetro del rodillo vibrante varía desde 1,10 a 1,50 metros.

Peso y cargas unitarias. El peso total oscila desde un mínimo de unas 7 toneladas hasta el máximo peso de 15,5 toneladas, repartiéndose aproximadamente el 40 % sobre el cilindro y el 60 % sobre las ruedas neumáticas.

La carga lineal unitaria sobre la generatriz de apoyo del rodillo está comprendida entre 25 y 30 kp/cm, y la carga por rueda, entre 2 y 3 toneladas.

Frecuencias y amplitud de vibración. Las frecuencias de trabajo suelen estar en el intervalo de 25 a 40 Hz (1500 a 2500 cpm), con amplitudes nominales a elegir, normalmente, entre dos o tres valores inferiores a 1 mm.

Velocidad. En régimen continuo de variación desde cero a 10-15 km/h, la velocidad de trabajo normal puede ser de 6 a 7 km/h.

2.1.3 Compactadores de pequeño tamaño y de tracción manual.

Se incluyen en este último grupo aquellas máquinas, de

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

reducidas dimensiones y pesos, destinadas a la compactación de zonas limitadas o de difícil acceso —trasdoses de muros y obras de fábrica, rellenos de zanjas, etc— y que no precisan, en general de tracción mecánica.

Pueden distinguirse tres grupos bien diferenciados: los pequeños *rodillos vibrantes*, las *placas vibrantes* y los *pisones*, vibrantes o de percusión.

a) Pequeños rodillos vibrantes.

Pueden ser *monocilíndricos*, (fig. 46), dotados de un solo cilindro vibrante y una pequeña rueda neumática de dirección, o dobles (fig. 47), en los que pueden ser vibrantes ambos cilindros o solo uno de ellos.



FIGURA 46

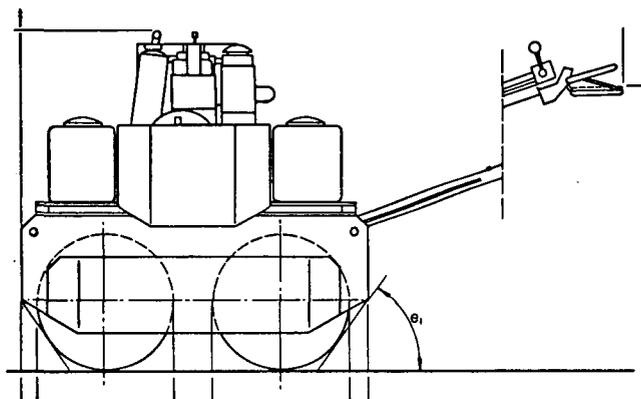
Dimensiones. El ancho de compactación varía generalmente de 0,60 a 0,75 m. y el diámetro del cilindro, de 0,40 a 0,50m.

Peso y carga unitaria. El peso total, en los monocilíndricos, está alrededor de los 500 a 600 kilogramos, y en los dobles, de 600 a 1200 kilogramos. La carga unitaria lineal bajo cada cilindro suele oscilar de 5 a 10 kp/cm de generatriz.

Frecuencia y amplitud de vibración. La frecuencia de trabajo es generalmente alta, de 55 a 70 Hz (3.300 a 4.200 cpm) y la amplitud nominal siempre inferior al milímetro (0,4 a 0,7 mm).

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

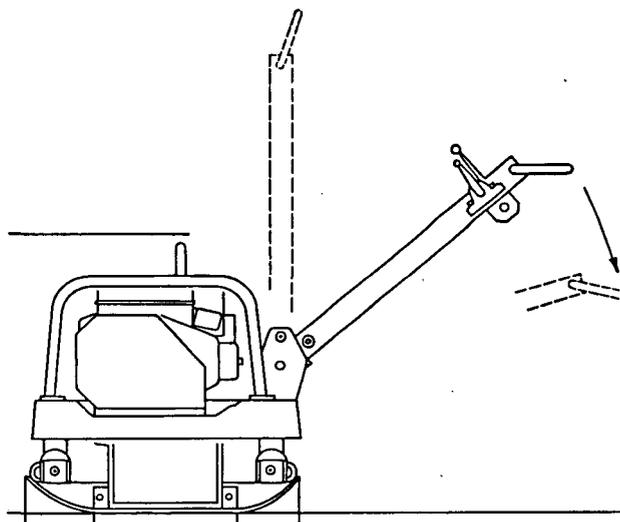
FIGURA 47



Velocidad. Mediante el accionamiento de una palanca situada en la barra de guía, el operador puede variar progresivamente la velocidad del rodillo, en ambos sentidos de marcha, hasta un máximo de unos 4 km/h (65 m/min).

b) Placas vibrantes. Son máquinas que transmiten el movimiento vibratorio a través de una bandeja (fig. 48), la cual a su vez, lo recibe del giro de masas excéntricas unidas a ella. El avance en uno o ambos sentidos de marcha, según el modelo de la placa, tiene lugar gracias a la componente horizontal producida por la combinación de la fuerza centrífuga de las masas giratorias y el peso de la máquina.

FIGURA 48



Dimensiones. La bandeja vibrante tiene una longitud que puede variar desde 0,50 hasta 1,00 metro en las de mayor tamaño. En cuanto al ancho, en muchos casos puede modificarse a voluntad mediante el suplemento de placas de extensión laterales, con lo que varía desde 0,30 m hasta un máximo de 80 centímetros.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Peso y carga unitaria. El peso total oscila entre los 70 a 100 kilogramos de las placas más ligeras, hasta 700-900 kg en las más pesadas. A partir de la combinación peso-área de contacto de la bandeja, puede caracterizarse una placa vibrante según la presión estática unitaria sobre el terreno. El valor más frecuente es del orden de 5 kPa, y el valor máximo alrededor de 18 kPa (0,18 kp/cm²).

Frecuencias y amplitud de vibración. Las frecuencias de trabajo utilizadas suelen estar comprendidas, para las placas ligeras, entre 85 y 100 Hz (5.000 a 6.000 cpm) y para las de mayor peso entre 30 y 40 Hz (1.800 a 2.500 cpm).

En cuanto a las amplitudes nominales, están en función de la relación entre la masa aislada y la masa de la bandeja vibrante. Cuando es próxima a 1, la A_0 puede ser del orden de 2,5 a 3,0 mm mientras que si se aproxima a 0,5 su valor oscila de 1,5 a 2,0 mm.

Velocidad. La velocidad de trabajo, para una placa de peso determinado, depende de la frecuencia empleada y de las condiciones del suelo compactado. Suele variar dentro de la gama de 20 a 25 m/min.

c) Pisones vibrantes y de percusión.

La pieza de base de estas máquinas (Fig. 49), está constituida por una placa de reducidas dimensiones, 20 a 30 cms de ancho por un largo de 30 a 40 cm, a través de la cual se transmite una rápida sucesión de impactos al terreno.

En los *pisones vibrantes*, los impactos se producen a una frecuencia de 500 a 600 golpes por minuto en los más pesados, y de unos 1000 golpes por minuto en los de menor peso. La vibración de la base se produce mediante un resorte (fig. 50) en el eje de la máquina, accionado por el cigüeñal que mueve un motor de dos tiempos.

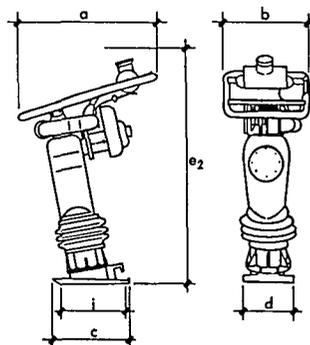


FIGURA 49

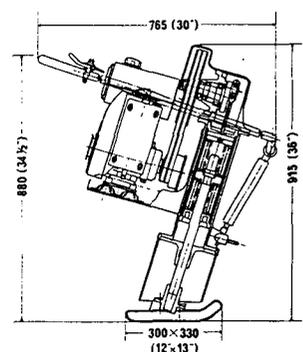


FIGURA 50

El *peso total* es, normalmente, de 60 a 100 kilogramos, aunque existen modelos que pesan alrededor de los 150 kilogramos.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

La *elevación* sobre el suelo en los impactos, suele ser del orden de 5 a 10 cm, mientras que la velocidad de avance, originada por la ligera inclinación del cuerpo de pisón respecto de la base, es de unos 10 a 12 m/min.

En los *pisones de percusión*, los golpes se consiguen a partir de una cámara de explosión. Al producirse ésta y transmitirse a la base, la reacción levanta toda la máquina, cayendo después por gravedad. Existen también modelos que funcionan como pisones neumáticos, mediante aire comprimido.

El efecto de compactación se consigue, tanto por la fuerza de la explosión como del impacto de caída del cuerpo del pisón sobre el suelo, a razón de 50 a 60 golpes por minuto.

El *peso total* de los pisones a percusión no suele pasar de un máximo de 100 a 120 kilogramos.

La *elevación* sobre el suelo en los impactos es del orden de 30 a 40 centímetros, y la velocidad de avance, que se consigue inclinando la máquina en el sentido de la traslación, no sobrepasa por lo general, los 8 metros por minuto.

2.2 Ejecución de la compactación

Una vez descritas las características principales de los diferentes medios de compactación, queda por analizar en qué medida, los *datos de partida* del problema, es decir, la *humedad* del suelo, el *espesor* de la capa y la propia *naturaleza* del material que la constituye, condicionan la elección del compactador más adecuado.

No hay que olvidar que la idoneidad del medio mecánico elegido se habrá de medir por su capacidad para conseguir, con el menor costo posible, la densificación requerida por las especificaciones evaluada, en general, por comparación con una densidad máxima de referencia. Esto nos lleva a introducir un factor adicional en el análisis, ligado lógicamente a los datos de partida antes enunciados, que es el *rendimiento* del compactador. La elección deberá recaer sobre la máquina que pueda alcanzar la *densidad exigida con el máximo rendimiento posible*.

Es importante señalar que el *grado de libertad* en la elección del compactador es hoy en día mucho más amplio que hace algunos años, cuando era obligado sujetarse a una simple tabla de correspondencia entre tipos de máquinas y materiales a compactar. Actualmente, la posibilidad de actuar, durante la compactación, sobre los parámetros de funcionamiento (vibración, presión de inflado, velocidad, etc.) unido a la diversidad de compactadores existentes dentro de una misma clase, permiten basar la elección en criterios de rendimiento y diponibilidad.

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

A continuación analizaremos, en primer lugar, la influencia de las variables *humedad* y *espesor de capa*. Después se verá el cálculo del *rendimiento* de un compactador y la incidencia que en el mismo tienen los distintos factores del problema. Por último, se expondrán los *criterios* que pueden orientar la elección del medio de compactación, en función del tipo de material a compactar.

2.2.1 Humedad de compactación.

En los gráficos densidad-humedad efectuados en Laboratorio, la energía de compactación venía definida por el número de golpes de una maza tipo sobre la muestra de suelo contenida dentro de un molde, de dimensiones también normalizadas.

Al pasar ahora a la realización de la compactación en obra, la energía que se aplica a la capa de suelo tiene una definición mucho más complicada, y específica de cada clase de máquina que se utilice, estática o vibratoria, de rodillo liso o con patas, etc. Sin embargo, a efectos de estudiar el papel del contenido de humedad en la compactación, es útil representar la energía aplicada por una máquina determinada, por el *número de pasadas* que efectúa sobre la capa de suelo.

En la figura 51, se ha representado, a la izquierda, las curvas de compactación correspondientes a tres valores crecientes de pasadas del compactador, junto a la curva de saturación del suelo.

Para una cierta humedad de la capa de suelo w_j , podemos ver, a la derecha, la curva densidad - n.º de pasadas deducida de las anteriores, que se aproxima asintóticamente a la densidad límite marcada por la curva de saturación del suelo. Si la especificación es superior a este límite, como ocurre en la figura, no cabe más solución que disminuir la humedad de la capa hasta una cierta w_j .

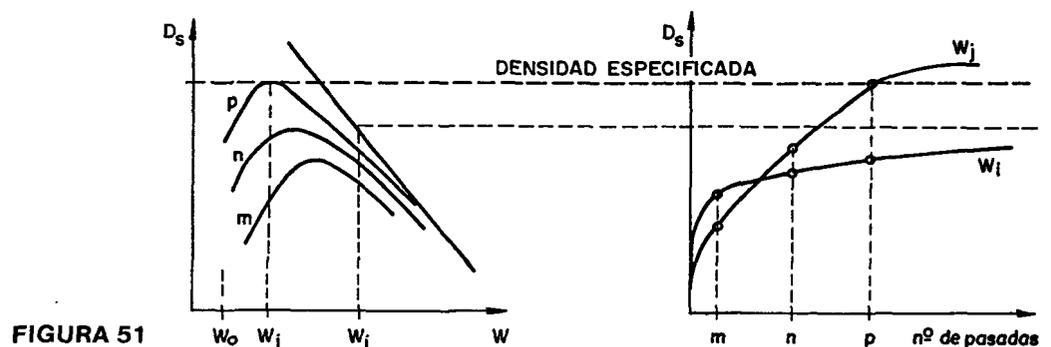


FIGURA 51

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

Si la humedad inicial del suelo es tal como la w_0 de la figura, en teoría podría alcanzarse la densidad especificada con un n.º de pasadas muy alto. Sin embargo, es posible que, por falta de «lubricación» en el suelo, llegáramos antes a romperlo. La única solución consistiría, nuevamente, en corregir la humedad, ahora aumentándola hasta un valor próximo a la w_j .

La *corrección de la humedad del suelo* es, a menudo, una operación delicada y costosa. Cuando es necesaria la adición de agua se requiere: a) determinar la cantidad a añadir en litros por metro cuadrado, mediante los oportunos ensayos de medida de la humedad natural. b) distribuir esta cantidad uniformemente en toda la superficie de la capa, regularizando ésta para evitar la formación de encharcamientos. c) dejar pasar el tiempo necesario para que el agua llegue a penetrar en todo el espesor de la capa extendida, tanto más cuanto mayor cohesividad presente el suelo.

Cuando es necesario, por el contrario, reducir la humedad, habrá que recurrir al escarificado, roturado del suelo con grada de discos o similar e incluso al volteo sucesivo de la capa con motoniveladora, con el fin de facilitar la evaporación. Tal operación puede requerir varios días, lo que obliga, si existe amenaza de lluvia, a cerrar la superficie con unas pasadas de rodillo al final de jornada, dejándola con pendientes suficientes no inferiores a 4 %.

En condiciones atmosféricas desfavorables, el problema de exceso de humedad puede no tener más solución que la remoción del suelo y su sustitución por otro en mejores condiciones, o la aplicación de métodos especiales, entre ellos, el sistema «sandwich» o el *tratamiento con cal*.

El sistema «sandwich» consiste en intercalar entre dos capas de material húmedo, una capa de material granular, zahorra natural etc, con el propósito de conseguir la compactación del suelo al tiempo que el exceso de humedad se va drenando a través de la capa de zahorra. A menudo, la rápida colmatación de los huecos de esta última, por los finos procedentes de las capas que la limitan, impide el éxito del sistema.

El tratamiento con cal (más excepcionalmente con cemento), se basa en la reducción de la humedad del suelo por medio de la hidratación del polvo de cal viva que se mezcla al mismo. El porcentaje añadido es pequeño, del orden del 2 %, pues no hay interés en alcanzar resistencias elevadas, sino simplemente permitir la puesta en obra y compactación del

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

suelo a corto plazo. El efecto de secado producido por la hidratación se favorece, además, por el calor desprendido en la reacción. Se estima que la adición del 1 % de cal viva puede rebajar la humedad del suelo en el 1,5 % aproximadamente. Además, se comprueba que la plasticidad del suelo se reduce y su humedad óptima de compactación es algo más elevada, todo lo cual facilita la solución del problema.

2.2.2 Espesor de tongada.

Una vez que la humedad del suelo, natural o corregida, se encuentra entre los límites deseados, aún hemos de determinar el *espesor óptimo* de capa, para conseguir la densidad exigida con el equipo de compactación disponible. Ha de tenerse en cuenta que la energía realmente aplicada por unidad de volumen de suelo, es función decreciente del espesor de capa utilizado, para un mismo número de pasadas.

Por compactación de la capa, se entiende la densidad media en todo el espesor de la misma, puesto que necesariamente se produce una distribución del tipo representado en la figura 52, según la cual la densidad aumenta desde la superficie hasta unos 10 ó 15 cm por debajo de ella, para después decrecer, con un cierto gradiente, hasta el fondo de capa.

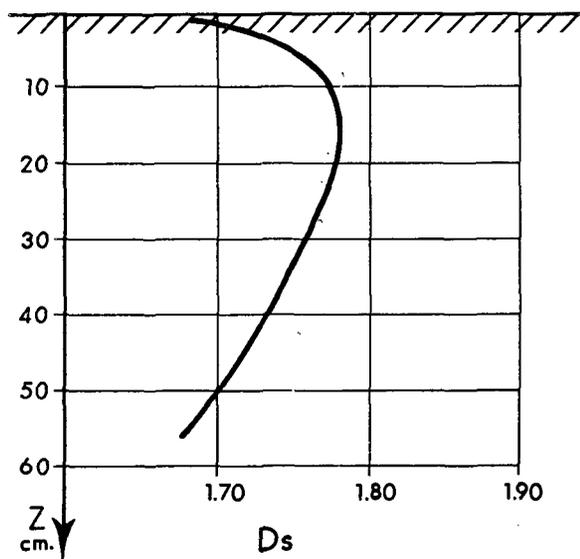


FIGURA 52

El primer condicionante en la distribución de la densidad con la profundidad, son las propias *características mecánicas*

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

del equipo de compactación empleado. Según ya vimos al tratar de estos equipos, el gradiente de disminución de la densidad será muy acusado al utilizar máquinas de *rodillo liso estático* y algo menos si es de *patas apisonadoras*. Con compactadores de *ruedas neumáticas* la densidad en el fondo de capa será tanto más elevada cuanto la carga por rueda sea mayor, mientras que, si se trata de *compactadores vibratorios*, esto se conseguirá subiendo la carga lineal unitaria por centímetro de generatriz con baja frecuencia de funcionamiento.

La utilización de compactadores de neumáticos de alta presión de inflado o vibratorios de alta frecuencia de vibración y menor carga lineal unitaria, produce elevadas presiones en superficie y rápida disminución con la profundidad, siendo por tanto aplicables para la compactación de capas delgadas.

El segundo factor que afecta de modo decisivo al espesor de compactación y la distribución de la densidad en profundidad es la *humedad del suelo*, en mayor medida cuanto más cohesivo es éste último. Cada espesor tiene en cierto modo, su *humedad óptima* de compactación, y ésta es más elevada cuanto más gruesa es la capa.

Una consecuencia práctica que se deriva de este hecho es que, puede resultar más conveniente en ciertos casos adaptar el espesor de capa a la humedad natural del suelo en lugar de actuar a la inversa, intentando corregirla por medios lentos y costosos. Ello, naturalmente, dentro de unos límites que deben ser determinados en tramos de prueba.

En consecuencia, la *elección del espesor* de compactación tiene un marcado *carácter económico*, dada su incidencia en la corrección de la humedad, y sobre todo, por su influencia directa en el cálculo del *rendimiento* del compactador, como se verá a continuación.

2.2.3 Rendimiento de un compactador.

Es el volumen de tierras que la máquina es capaz de compactar, hasta la densidad requerida, expresado en metros cúbicos por hora. Si el compactador se desplaza a una velocidad de v metros por hora, cubriendo un ancho de a metros en cada pasada, y precisa de n pasadas para compactar el espesor e , expresado en metros, es claro que el rendimiento puede calcularse mediante la fórmula:

$$Q \text{ m}^3/\text{h} = C_u \cdot \frac{a \cdot v \cdot e}{n}$$

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

donde C_u es un coeficiente de utilización del compactador, que tiene en cuenta los tiempos muertos a causa de maniobras, cambios de sentido, etc y puede variar de 0,6 a 0,8 según las condiciones del trabajo.

No hay que olvidar que el rendimiento dado por la fórmula supone que se obtiene, al final de las n pasadas, la densidad especificada en todo el espesor de la capa. Es esta condición la que hace intervenir, por una parte, la naturaleza y humedad del suelo y, por otra, la influencia de los parámetros de funcionamiento de la máquina.

Para una determinada exigencia de compactación, el *rendimiento* aumenta proporcionalmente al espesor de capa. En todo caso (fig. 53) se llega a un cierto espesor, a partir del cual el rendimiento baja por ser necesario un número de pasadas excesivo. Para espesores aún mayores, puede ser imposible conseguir la densidad. El *espesor óptimo* será tanto más elevado cuanto menor sea la densidad exigida, como queda reflejado en las curvas de la figura.

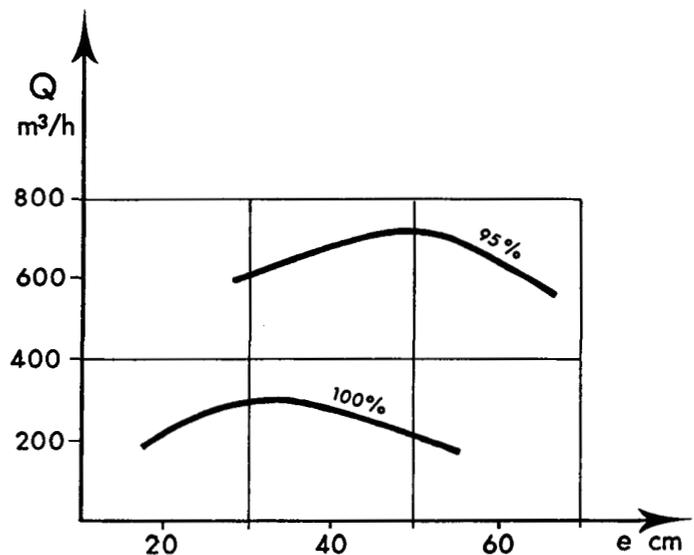


FIGURA 53

En cuanto a la variable *velocidad del compactador*, su influencia sobre la densidad obtenida es muy distinta, según que la máquina sea de efecto estático o vibratorio. En el primer caso, el aumento de la velocidad de traslación se traduce en una ligera disminución de la densidad media, presentando su distribución en profundidad un gradiente algo más acusado que con velocidades menores.

En las máquinas vibratorias, en cambio, la influencia de la velocidad en la densidad de compactación es decisiva, ya que el número de aplicaciones del esfuerzo dinámico, en

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

cada pasada, es inversamente proporcional a dicha velocidad. Por ejemplo un rodillo a la frecuencia de 30 Hz, ejerce $\frac{30 \times 60 \times 60}{3.000} = 36$ impactos en cada metro lineal de avance, si

se desplaza a la velocidad de 3 km/h, mientras que si le hacemos circular a 4,5 km/h, cada metro lineal recibirá solamente 24 impactos en cada pasada.

En consecuencia, y especialmente con máquinas vibratorias, existe una *velocidad óptima*, que produce el máximo rendimiento consiguiéndose la densidad exigida con el mínimo número de pasadas, a espesor constante, o con el máximo espesor, a número de pasadas constante. Por lo general se admite que la velocidad óptima, para compactadores de neumáticos, está comprendida entre 3,5 y 5 km/h, y para los vibratorios, entre 2 y 3 km/h. Para los compactadores autopropulsados de patas apisonadoras, puede tomarse como media 12 km/h, siempre que actúen solo como compactador, sin la hoja extendedora.

La determinación del *rendimiento máximo* de un compactador es una característica compleja y requiere la realización de tramos de ensayo con valores variables de humedad, espesor, velocidad y número de pasadas de la máquina. Para cada combinación de estos tres últimos parámetros, el cálculo y comparación de los rendimientos obtenidos se pueden facilitar mediante la construcción de un *sencillo ábaco*, como el representado en la figura 54.

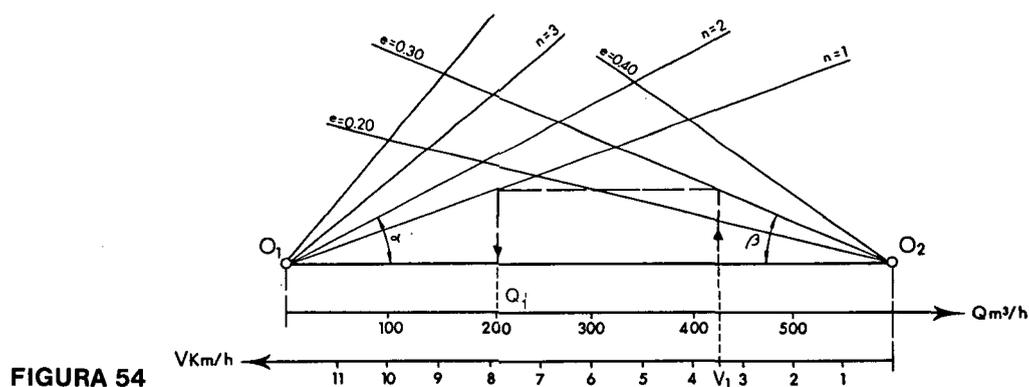


FIGURA 54

Se trazan dos haces de rectas, a partir de dos puntos O1 y O2, origen de rendimientos y velocidades, respectivamente. El primer haz, tomando $\text{tg} \alpha = n$, número de pasadas, y el segundo $\text{tg} \beta = a.e$, ancho de compactador por espesor de capa. Así, para una cierta velocidad V, basta levantar la vertical hasta el espesor deseado, después en horizontal hasta el número de

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

pasadas y, desde éste punto, en vertical puede leerse el rendimiento correspondiente Q_1 .

2.2.4 Elección del compactador en función del tipo de suelo.

Teniendo presentes las consideraciones relativas a humedad, espesor de capa y rendimiento del compactador, veamos finalmente como influye la naturaleza del material a compactar en la elección de la máquina más idónea. Consideraremos tres grandes grupos de materiales: *suelos finos*, limosos o arcillosos, *suelos de grano grueso*, con finos o sin finos y *pedraplenes*.

Suelos finos.

Suelen caracterizarse como tales aquéllos que contienen más del 35 % de limos y arcillas, es decir de la fracción inferior a 80 micras.

La propiedad fundamental de estos suelos, en lo que a compactación se refiere, es la dificultad que presentan, tanto para reducir como para incrementar su humedad en una capa previamente extendida. Cuanto más plástico en el suelo, menor es su permeabilidad y más difícil, por tanto, corregir su humedad natural.

En caso de una lluvia, sin embargo, la plasticidad del suelo puede tener un efecto contrario. Una capa de material limoso ligeramente plástico, IP alrededor de 15 por ejemplo, absorberá mayor cantidad de agua y tardará más en secar que otra de suelo arcilloso, en la que el agua procedente de la lluvia habrá penetrado con más dificultad y sólo tendrá que evaporarse superficialmente. En cualquier caso, *el estado de humedad* de estos suelos condiciona fuertemente el equipo de compactación más indicado.

Si la humedad natural del suelo se encuentra en un entorno *próximo a la humedad óptima* del Proctor Normal, alrededor de $\pm 1\%$ en los menos plásticos ó $\pm 3\%$ en los de IP superior a 20, puede utilizarse una amplia gama de compactadores, que va desde los neumáticos y de patas apisonadoras hasta los vibrantes lisos. Se empleará más energía por unidad de volumen para los de mayor plasticidad, o sea, espesores más reducidos y/o mayor número de pasadas. El espesor puede variar así, desde 20 a unos 50 centímetros, debiéndose utilizar, si se trata de rodillos vibratorios, baja frecuencia y alta amplitud nominal.

Cuando la situación es de *defecto de humedad*, por debajo

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

de los límites antes señalados, la compactación se hace muy difícil, en especial en los más plásticos, que alcanzan una gran cohesión y alta resistencia de los terrones a pulverizarse. El extendido en capas delgadas, junto al empleo de compactadores de patas apisonadoras autopropulsados, puede ser el método más indicado antes de decidir la adición de agua.

Si por el contrario el problema es de *exceso de humedad* por encima de los límites mencionados, los suelos finos de plasticidad baja a media solo pueden compactarse con energía reducida, evitando así que el suelo llegue a la saturación con la consiguiente pérdida de estabilidad. A veces se consigue compactar en capas gruesas, de 40 a 60 cms, empleando compactadores remolcados vibratorios con patas apisonadoras de peso superior a 10 T.

Cuando la humedad natural del suelo llega a ser la correspondiente a un CBR inferior a 5 para energía del P.N., puede presumirse que será necesario sustituir el suelo o bien aplicar una de las técnicas especiales antes aludidas (sandwich o tratamiento con cal).

Suelos de grano grueso con finos.

En este grupo se incluyen los suelos con una proporción de finos superior al 5 %, sin llegar al 35 % de la clase anterior.

Es característico de estos suelos su notable sensibilidad a pequeñas *variaciones de humedad*, más acusada a menudo que en un suelo calificado como fino. La razón es que las partículas de la fracción fina incrementan su humedad en mucha mayor proporción que el conjunto, dada la escasa absorción que tienen, comparativamente, los elementos gruesos del suelo.

Por otra parte, es de señalar el importante papel que juega el *porcentaje de gruesos* en el suelo, pudiendo llegar a impedir, dependiendo de su gradación de tamaños, la compactación de la fracción más fina. Puesto que también el grado de plasticidad de esta última influye, no es posible fijar «a priori» un valor máximo para la proporción de gruesos, sino que hay que basarse en la experimentación en cada caso.

Los compactadores de patas apisonadoras son menos adecuados y, en general, se debe recurrir a *vibratorios* o de *neumáticos pesados*, empleando espesores de capa de hasta 50 y 70 cms si la humedad es la apropiada.

Suelos de grano grueso sin finos.

Se trata de suelos en los que el porcentaje de finos, por debajo de 80 micras, no llega al 5 %. Varían desde los más arenosos hasta aquellos que contienen una proporción elevada de tamaños superiores a 5 mm.

La escasa cohesión de estos suelos hace que los compactadores con alta presión de contacto tiendan a hundirse en ellos y, por lo tanto, sea necesaria una *precompactación li-*

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

gera, por ejemplo con neumáticos de baja presión de inflado, al comienzo del trabajo.

Si se trata de *suelos arenosos*, los compactadores de neumáticos y, aún mejor, los vibratorios son eficaces. Con estos últimos puede llegarse a compactar espesores de un metro e incluso mayores en algunos casos. La vibración debe efectuarse con frecuencia más bien alta, alrededor de 30 Hz, y amplitudes nominales tanto más bajas cuanto menos cohesión presente el suelo.

Si la *proporción de gruesos* es más importante, se hace necesario recurrir a compactadores vibratorios de alta carga lineal unitaria, y puede emplearse espesores algo inferiores a los antes citados. La velocidad de traslación del rodillo no debe superar los 2 km/h.

Debido a la ausencia de cohesión, la vibración puede producir una *descompactación superficial* en la última fase del trabajo. Para evitarla basta, por lo general, dar una o dos pasadas finales estáticas, o bien dejar que se corrija con la compactación de la tongada siguiente. Un caso especial lo constituyen las *arenas de granulometría uniforme*, que deben ser compactadas regando abundantemente y empleando máquinas de neumáticos con baja presión de inflado o vibratorias de reducida carga unitaria.

Pedraplenes

Se trata de materiales que contienen grandes elementos pétreos de hasta 80 cm y, menos usualmente, 1,00 metro de tamaño máximo. Esta característica condiciona el espesor mínimo de capa, con independencia del medio de compactación, debiendo ser superior, al menos, en un 50 % a aquél tamaño máximo.

Si se trata de *piedra degradable*, el material se convierte, tras el extendido y la compactación, en un suelo de grano grueso con finos, del tipo antes descrito.

Si se trata, en cambio, de *roca sana y dura*, es importante conseguir que el material fino no impida el contacto directo entre los elementos de mayor tamaño. Para ello, además de limitar a un 30 % del total la proporción de la fracción fina, es necesario a veces, el riego con agua a presión de la capa extendida.

El volumen de huecos, al final de la compactación, difícilmente puede reducirse a menos del 25 % del volumen total, lo cual significa una *alta permeabilidad* del relleno. Ello hace posible, por otra parte, que la compactación de los pedraplenes pueda realizarse, sin dificultad, en tiempo lluvioso.

El medio de compactación más indicado para este tipo de material es el *vibratorio pesado*, con carga unitaria superior a

METODOS Y EQUIPOS DE COMPACTACION

45 kp/cm. La frecuencia de trabajo debe ser relativamente baja, del orden de 20 Hz, con rodillo de alta amplitud nominal. En ocasiones, son también utilizados los *supercompactadores* de neumáticos de carga total superior a las 50 toneladas.

3.

SECCION TERCERA EL CONTROL DE LA COMPACTACION

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

La finalidad del *control de la compactación* de las obras de tierra es comprobar que el producto final, esto es el material compactado, cumple las condiciones marcadas por las especificaciones. Salvo casos particulares, en los que estas condiciones se expresan en términos de deformación o asiento máximo bajo carga, de ordinario se prescribe un valor mínimo del llamado *porcentaje de compactación*, es decir la relación entre la densidad seca del material compactado y una densidad seca de referencia, obtenida en Laboratorio, en condiciones normalizadas.

La comprobación efectiva de que esta condición es satisfecha de modo uniforme por un producto en masa y con características variables, como es la obra de tierras compactada, encierra ciertas *limitaciones* que no deben ser ignoradas:

- a.—Los ensayos disponibles para el control solo tienen una precisión relativa, y sus resultados comportan un cierto margen de variabilidad imputable al método de medida y al operador.
- b.—Las heterogeneidades locales en el material empleado y las propias del sistema de compactación, añaden un factor más de variación, por lo que los resultados de los ensayos solo pueden tomarse como una estimación de las características del total del producto.

Si a estas limitaciones se añade el condicionamiento del tiempo de respuesta requerido por los ensayos, frente a unos ritmos de producción que frecuentemente alcanzan varios miles de metros cúbicos por hora, se comprende la necesidad de estudiar cuidadosamente el método a emplear para que la comprobación de la compactación de la obra de tierras se realice de modo efectivo y fiable a la vez.

3.1 Los sistemas de control de la compactación

En cualquier tipo de control de calidad, incluyendo el que nos ocupa, son aplicables indistinta o conjuntamente dos sistemas básicos: el *control del «producto terminado»* y el *control del «proceso»*. Ambos tienen sus ventajas e inconvenientes para el control de la compactación, como veremos a continuación. Según los casos, hay especificaciones como las inglesas, que se inclinan totalmente por el segundo sistema, otras, como la mayoría de las norteamericanas, lo hacen por el de «producto terminado», y finalmente algunas, como las francesas y, en cierta medida las nuestras, por una combinación de ambos tipos de control.

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

3.1.1 Control del «producto terminado».

Es el sistema que podríamos llamar clásico contractual, según el cual se controla únicamente la densidad final alcanzada en una serie de puntos de cada capa compactada, y se compara con la especificación.

En su versión tradicional, largamente utilizada, los puntos de control son *seleccionados* previamente por la Inspección, a intervalos más o menos regulares. Se intensifica o reduce el número de medidas en función de la confianza que merezca la ejecución, pero siempre respetando un mínimo de ensayos por volumen unitario, fijado por los Pliegos. Por este sistema, la evaluación de los resultados difícilmente puede tener, tanto si se basa en el *valor mínimo* obtenido, como en el *valor medio*, la necesaria fiabilidad. En el primer caso, porque el valor escogido como decisorio puede corresponder a una frecuencia insignificante dentro de la distribución real de las densidades de la capa, y en el segundo, porque no se evalúa la uniformidad de la compactación.

Estos inconvenientes, agravados al aumentar los ritmos de producción en las obras de tierra y en consecuencia, la dificultad de una selección cuidadosa de los puntos de ensayo en cada control, han llevado a adoptar una orientación estadística en el sistema, introduciendo los conceptos de *lote de control* y de *muestreo aleatorio*. Las Recomendaciones para el Control de Calidad de la Dirección General de Carreteras (1979), establecen el tamaño máximo del lote en 5.000 m² por muestra, definiendo ésta por el conjunto de cinco puntos de medida, distribuidos aleatoriamente en dicha superficie.

En cuanto al criterio de evaluación de los resultados de los ensayos, el *valor medio* obtenido para cada muestra debe superar la especificación, pudiendo admitirse en los *valores individuales* hasta un 2 % por debajo de la misma.

Se ha intentado ampliar esta orientación hasta un control puramente estadístico de la compactación, basado en *gráficos de control*. Se parte de una supuesta desviación típica global del procedimiento de ensayo, y se fija el número de medidas por muestra para obtener el nivel de riesgo deseado, de aceptación errónea (Administración) o de rechazo erróneo (Contratista). Sin embargo, solo en casos muy especiales de homogeneidad y continuidad, puede estar justificada esta aplicación, ya que, a menudo, la dispersión propia de los métodos de ensayo es comparable a la del producto que se controla y, además, la normalidad de la ley de distribución de las densidades, necesaria para la validez de los gráficos de control, es bastante cuestionable.

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

Es importante señalar que el control de un lote por muestreo aleatorio exige, para que su aplicación sea válida, que las variaciones de densidad que presente el lote sean *independientes* de causas determinadas y localizables. En caso contrario, estas deben ser detectadas antes de realizar el control y las zonas afectadas, corregidas hasta su homogeneización con el resto de la capa.

Tampoco debe olvidarse que el resultado negativo del control de un lote, implica que no se realice un nuevo muestreo aleatorio del mismo, hasta tanto se hayan aplicado las medidas correctoras de la causa que originó el defecto de compactación (número de pasadas, exceso o defecto de humedad, etc.).

3.1.2 Control del «proceso»

El sistema de control descrito en el apartado anterior, en sus diferentes variantes, delimita claramente las responsabilidades del Constructor, al dejar prácticamente a su arbitrio las modalidades del proceso de compactación. Este hecho es una ventaja más aparente que real, pues el rechazo eventual de unidades defectuosas y la corrección de las mismas, redundan en definitiva en perjuicio de los plazos y costos de la obra.

Por otra parte, elevar el nivel de fiabilidad de un control basado exclusivamente en medidas sobre «producto terminado», en casos de cierta heterogeneidad, puede llevar a un aumento del número de ensayos, prohibitivo por razones de costo y de ritmo. Ello ha conducido a algunas especificaciones a fijar el control sobre el «proceso» es decir, sobre aquellos parámetros de la ejecución, relativos tanto a los materiales como a las máquinas, que condicionan la calidad final. Se pretende así crear unas *condiciones objetivas* de cuyo cumplimiento se puede esperar, con cierta garantía, la obtención de la misma.

Un primer método para ello es establecer en las especificaciones unas tablas según los diferentes tipos de suelos que pueden presentarse, tablas en las que se detallan el tipo y parámetros de las máquinas a emplear, el espesor máximo de trabajo y, finalmente un número mínimo de pasadas en cada caso; así lo hacen, por ejemplo, las Normas británicas. En lugar de fijar un número de pasadas mínimo, difícil de controlar en la obra, puede emplearse un parámetro equivalente, como hacen las Normas francesas, que es la relación Q/S, entre el volumen compactado y la superficie barrida por la máquina por unidad de tiempo, susceptible de medida mediante un contador kilométrico incorporado a la misma. Como

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

puede fácilmente comprobarse, aquélla relación equivale a e/n , espesor dividido por número de pasadas. Por tanto, para un espesor prefijado, si queremos respetar unas pasadas mínimas de compactador, basta exigir en obra el valor de la relación Q/S que corresponde.

Este método es aplicable únicamente cuando existe un conocimiento suficiente de las clases de suelos que van a constituir la obra de tierras, bien sea por estudios previos a la misma o por semejanza con otra de similares características.

Un segundo método consiste en realizar, al iniciarse los trabajos de compactación, *tramos de pruebas* con los principales suelos que se utilizarán en la obra. En definitiva se trata de construir, sobre un soporte estable, una tongada de superficie suficiente, 300 a 400 metros cuadrados por tipo de suelo, para permitir ensayar dos o tres valores de espesores y humedades. La tongada se compacta en pasadas sucesivas con el medio o los medios de compactación preseleccionados en función de la naturaleza de los suelos, anotándose los parámetros de funcionamiento de los mismos empleados en las pruebas.

Finalmente, se efectúan las medidas de densidad después de cada pasada, y los resultados se llevan a un *gráfico densidad-número de pasadas* (ver fig. 51). Si se desea ensayar espesores superiores a 30 cms debe medirse además la densidad en fondo de capa, con objeto de comprobar el gradiente de densidad para cada humedad de prueba.

El número de variables sometidas a ensayo debe reducirse en lo posible, dada la acumulación de medidas a que dan lugar y el tiempo necesario para su realización. Del estudio de los resultados se deducen las condiciones a exigir en el control sobre el «proceso», relativas a *espesores, humedades y parámetros de maquinaria*.

La aplicación exclusiva de este sistema de control requiere una permanencia de las condiciones iniciales, difícil de asegurar en una obra de tierras. De lo contrario, no hay ninguna garantía sobre los resultados que se obtendrán a partir de un mismo proceso de ejecución. Por otra parte, el control por la Administración de las variables que intervienen en el «proceso», implica un compromiso en la calidad final obtenida, difícil de asumir contractualmente.

3.1.3 Sistema mixto de control.

Se trata en definitiva de complementar entre sí los dos métodos anteriores actuando de la siguiente forma:

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

- a) Condiciones del proceso de ejecución. Se obtienen mediante tramos de prueba, al ensayar diversos valores de espesores, humedades y parámetros de máquina, o bien a través de especificaciones de los Pliegos particulares.

Se efectúa un número, suficientemente grande, de medidas de la compactación obtenida, tanto en las pruebas como en los primeros días de ejecución. Este conjunto de datos constituirá la población de referencia para el control.

Durante la ejecución, el control asegura que se mantienen las condiciones que sirvieron de base para las pruebas ó para las especificaciones particulares. Este aspecto del control debe estar preferentemente a cargo del Constructor (auto-control), que así queda involucrado en la responsabilidad del resultado final.

- b) Comprobación de la calidad final. Se efectúan esporádicamente series de medidas de compactación, de modo aleatorio, para su comparación con la población de referencia. Puesto que el número de medidas, en general, no será lo bastante elevado para permitir basarse en la media y desviación típica, puede utilizarse para la comparación un test basado en la totalidad de los valores obtenidos (ver test de Wilcoxon en el Apéndice).

En definitiva, cada uno de los tres métodos de control de la compactación puede estar más o menos indicado en función de las circunstancias particulares de cada caso, que pueden resumirse así:

Control por «producto terminado». Homogeneidad dudosa de los materiales y métodos de ejecución. Ritmos de obra medios a bajos. Posibilidad de efectuar elevado número de medidas de densidad (ensayos nucleares, por ejemplo).

Control de «proceso». Materiales y ejecución homogéneos. Ritmos altos de producción. Dificultad para efectuar muchos ensayos con tiempo rápido de respuesta.

Control mixto. De general aplicación, poniendo mayor énfasis en el «proceso» o en el «producto terminado», según prevailezcan unas u otras de las circunstancias antes señaladas.

3.2 Los ensayos de medida de la compactación.

Cualquiera que sea el procedimiento de control adoptado es preciso medir de algún modo la compactación, bien sea como ensayo de recepción de una capa de suelo terminada o, en un tramo de pruebas, para establecer condiciones del pro-

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

ceso de ejecución. En esencia, puede distinguirse *dos clases de medidas*:

- a.—Medida de *porcentaje de compactación*. Se establece una densidad de referencia en Laboratorio, y se mide la densidad in situ, bien sobre una muestra extraída de un agujero practicado en la capa o bien a través de una sonda nuclear.
- b.—Medida de la *deformabilidad del suelo*. Se calcula el módulo de deformación de la capa compactada mediante el ensayo de placa de carga, o bien se observa o se mide la deformación de la capa de suelo al paso de cargas.

Otros métodos no han llegado a convertirse en medios rutinarios de control de la compactación en obra. Entre ellos, la determinación del *módulo de elasticidad dinámico* del suelo, mediante la aplicación de una carga de impacto a través de una placa y el registro de las alturas de caída y de rebote. O bien, la *medida en continuo* de la reacción causada en el compactador por la densificación progresiva de la capa de suelo, tal como la aceleración producida en la masa vibrante del rodillo. La dificultad para evaluar la influencia de la humedad del suelo en los resultados, ha hecho difícil el uso de éstos métodos para la medida de la compactación, al menos en el control de obras de tierra.

3.2.1 Medida del porcentaje de compactación.

Este tipo de medida requiere describir, en primer lugar, cómo se establece en laboratorio la densidad patrón, y después qué métodos se utilizan para medir «in situ» la densidad seca de un suelo.

1º. Determinación de la densidad de referencia.

El ensayo Proctor consiste en compactar por capas muestras de suelo, amasadas con diferentes humedades, en el interior de un molde cilíndrico de dimensiones normalizadas, mediante los golpes de una maza pisón que cae desde una altura fija. Se definen dos niveles de energía Proctor, para los cuales se obtienen las correspondientes curvas de compactación (ver 1.3.4):

- La *curva Proctor Normal*, aplicando a 3 capas de suelo de unos 4 cm de espesor, 25 golpes de un pisón de casi 2,5 kg de peso, que cae desde 30 cm de altura.
- La *curva Proctor Modificado*, aplicando a 5 capas de suelo de unos 2,5 cm de espesor, 25 golpes de un pisón

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

de algo más de 4,5 Kg de peso, cayendo desde una altura de 45 cm.

En lugar del molde de unos 10 cms de diámetro, al que corresponden estos valores, es recomendable, sobre todo para suelos con elementos superiores a 5 mm, utilizar un molde mayor, de unos 15 cms de diámetro, para ambas curvas Proctor, en cuyo caso los golpes por capa deben ser 55 con el fin de mantener los mismos niveles de energía.

Cuando el suelo contiene una cierta proporción de tamaños de 20 a 50 mm, ésta debe sustituirse por material de 5 a 20 mm, en la forma que indican las Normas de ensayo.

De las curvas de compactación se deducen los respectivos valores de *densidad seca máxima* y *humedad óptima* del suelo. El primero sirve de referencia para determinar el porcentaje de compactación, al dividir por él la densidad seca medida in situ. El segundo es indicativo del entorno de humedad más conveniente para la compactación.

Un factor que influye de forma notable, sobre todo en *suelos cohesivos*, sobre la fiabilidad de los resultados de los ensayos, es el tiempo requerido por la muestra de suelo para la total absorción del agua añadida en cada punto de la curva Proctor. Se ha comprobado, en suelos de plasticidad elevada, un aumento sensible de la humedad óptima y disminución de la densidad máxima, cuando la curva se ha determinado después de dejar algunos días de imbibición a las muestras.

El ensayo Proctor requiere, por tanto, un tiempo de ejecución relativamente elevado, al menos algunas horas, y no puede efectuarse para cada control de la densidad in situ. El método más recomendable en obra es llevar a cabo, en su comienzo, una serie de ensayos Proctor para cada tipo de suelo a utilizar, aplicando después, en cada caso, los valores de densidad máxima más probables, y ajustándolos en el desarrollo de los trabajos.

Existen métodos para seleccionar el valor de la densidad máxima a utilizar, sin necesidad de elaborar la curva Proctor, pero, en general, no son de aplicación en las condiciones de heterogeneidad frecuentes en las obras de tierras. Uno de ellos, Fig. 55, consiste en tener dibujadas de antemano las curvas de densidades húmedas de los diferentes tipos de suelos anotando, para cada una de ellas, la densidad seca máxima Proctor que le corresponde. En el ensayo de control se determina la humedad del suelo y su densidad húmeda, representando el punto por estos dos valores en el gráfico, y viendo así qué curva le corresponde y, por tanto, qué valor de la densidad seca aplicar.

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

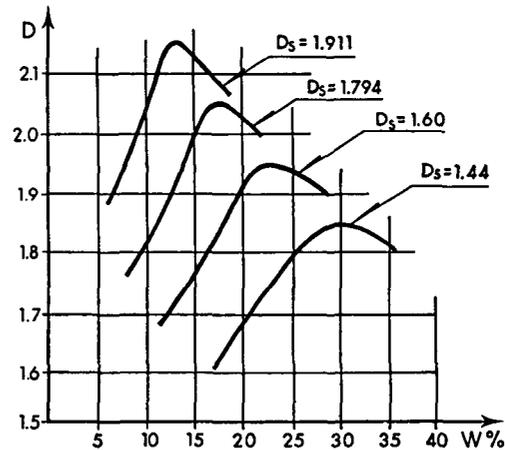


FIGURA 55

La densidad seca máxima, en los suelos *cohesivos*, suele variar desde 1,25 a 1,45 T/m³, cuando el IP es superior al 35%, y llega a ser de 1,70 a 1,85 T/m³ en los suelos de IP inferior al 20 %. Las humedades óptimas, también como valores orientativos, pueden oscilar del 24 al 40 % en los primeros y del 12 al 20 % en los segundos.

En los suelos *de tipo granular*, con suficientes finos, las densidades llegan a 2,20 T/m³, y siempre superiores a 1,80 T/m³. Las humedades óptimas, varían desde el 5 al 10 %, aproximadamente.

Se suele adoptar, como densidad de referencia para el control, la del P.M. para los suelos definidos como seleccionados o adecuados (ver 1.1.2 y 1.1.3) y la del P.N. para los demás, exigiendo según los casos, entre el 95 y el 100 % de porcentaje de compactación.

2º. Determinación de la densidad in situ.

Para la medida de la densidad seca en un punto determinado de una capa de suelo, se utilizan esencialmente *dos procedimientos*:

- Extracción de una muestra del suelo, midiendo el volumen que ocupaba en la capa.
- Emisión de una radiación gamma a través del suelo compactado, detectando la parte que no colisiona con las partículas sólidas del suelo.

a) *El primer procedimiento*, consiste en practicar un agujero cilíndrico en la capa de suelo, determinando por un lado el peso de la muestra, por otro el volumen del agujero, y por cociente de ambos, la densidad aparente, también llamada «densidad húmeda» del suelo. Por otra parte, se determina, sobre una fracción de la muestra, la humedad w . El cociente densidad húmeda/(1+W) nos proporciona la densidad seca del suelo.

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

Las variantes de este procedimiento difieren en el modo de medir el volumen del agujero. Puede hacerse llenándolo con un líquido viscoso, tipo aceite, con intermedio o no de una membrana elástica que se adapte a las paredes del agujero. Más exacto y cómodo de ejecución es el *sistema de la arena*. Consiste en llenar el agujero con arena seca calibrada y de tamaño uniforme, siguiendo un proceso normalizado (NLT - 109/72), con la ayuda de un sencillo sistema de doble embudo. El volumen del agujero viene dado por el peso de arena utilizado en el llenado, dividido por su densidad.

En cuanto a la *determinación de la humedad*, se hace por *deseccación en estufa* o, más frecuentemente, empleando el secado *por calentamiento* o mediante *quemado con alcohol* hasta peso constante. Un método rápido, especialmente para suelos poco plásticos, es el del *carburo de calcio*. Una pequeña muestra de suelo se introduce en una botella hermética (Fig. 56). La presión del gas que se produce en la reacción del agua del suelo con el carburo, se lee en un manómetro incorporado a la botella. La calibración previa del aparato nos permite traducir la lectura a porcentaje de humedad de la muestra.

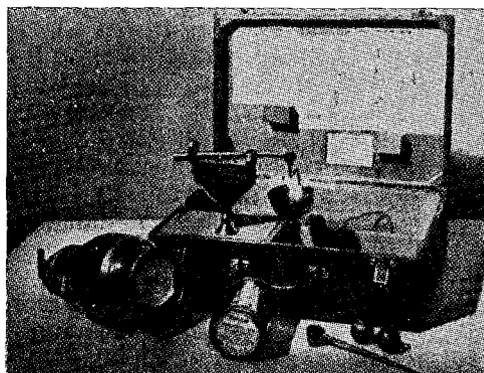


FIGURA 56

Ninguno de los métodos rápidos de determinación de la humedad es tan preciso como la desecación en estufa. Puede reducirse notablemente el tiempo de ensayo mediante el calentamiento con infrarrojos en los microondas.

Sin embargo, no hay que olvidar que variaciones del 1 % en la humedad, solo afectan moderadamente al resultado del porcentaje de compactación. Así, del 10 al 11 % de humedad, una densidad húmeda de 1,95 representa el 93,3 ó el 92,5 % respecto 1,90 de densidad Proctor.

La precisión del método de la arena depende, de la utilización del valor correcto para la densidad de la arena calibrada, del tamaño del agujero, como mínimo de 12 cm y mejor de 15 cm de diámetro, y de la presencia de elementos gruesos en la

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

muestra extraída. En este último caso, se debe descontar el volumen de los gruesos, bien introduciéndolos en el agujero junto con la arena calibrada, o calculándolo por cociente entre su peso total y su peso específico.

b) *El segundo procedimiento* consiste en el empleo de *aparatos nucleares*. Su difusión ha representado un extraordinario avance en el campo del control de la compactación. La rapidez de la medida, que permite hacer del orden de diez ensayos por uno del método de arena o similar, ha hecho posible utilizar conceptos estadísticos en el control. Por otra parte, la influencia de posibles errores debidos al operador o al método de medida, queda muy disminuída. Según algunas investigaciones, la desviación típica, en suelos homogéneos, de las densidades determinadas por el método de la arena es del orden de $0,12 \text{ T/m}^3$, mientras que la correspondiente a los métodos nucleares es de $0,05 \text{ T/m}^3$. Es de señalar, sin embargo, que con estos últimos, la presencia de elementos gruesos en el suelo puede hacer muy insegura su aplicación.

El principio de funcionamiento de los aparatos nucleares es el siguiente. Una fuente, constituída por un isótopo radiactivo, emite una radiación de *rayos gamma* (fotones), para la medida de densidad, o de *neutrones rápidos*, para la medida de humedad.

En el mismo aparato se incorpora, a una cierta distancia de la fuente, un detector que registra la presencia de los rayos gamma o de los neutrones que le llegan después de atravesar la capa de suelo.

Los *detectores* están basados en la medida de la ionización producida de forma indirecta por la radiación al pasar por el suelo. Cada vez que hay ionización, se registra una señal en un circuito electrónico adecuado.

Medida de la densidad. Cuando las partículas (fotones) de una radiación gamma atraviesan el suelo, se produce su colisión con los átomos que en él se encuentran. Como consecuencia del choque, una parte de los fotones se dispersa (efecto Compton) tras una cierta pérdida de su energía, mientras que otra parte son absorbidos y transmiten toda su energía a los electrones de los átomos con los que han colisionado.

Hay dos sistemas (fig. 57): el de *retrodispersión* y el de *absorción* de los rayos gamma. En el primero, la fuente radiactiva se sitúa sobre la superficie, y la capa afectada por la medida es como máximo de unos 15 cms. En el segundo, la fuente se introduce en un taladro a la profundidad deseada.

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

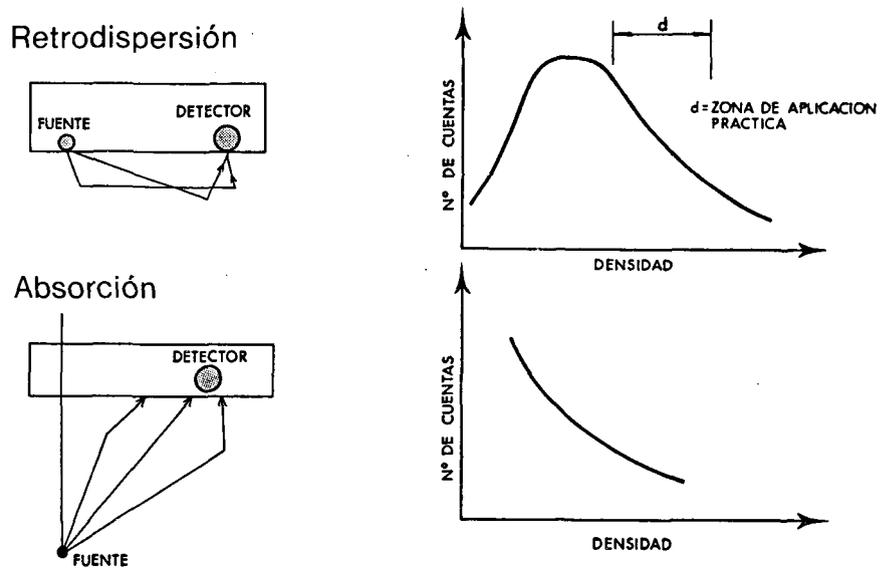


FIGURA 57

El número de fotones que no llegan a colisionar disminuye exponencialmente con la densidad del suelo y, por tanto, en ambos sistemas, a mayor densidad, la cantidad de fotones que llega al detector es menor.

Los factores causantes de *posible error*, y cuya incidencia es menor en el sistema de absorción, son los siguientes:

- La curva de calibración debe realizarse con el mismo material que se va a controlar, pues la composición química del suelo tiene influencia en los valores de calibración.
- El sistema de conteo electrónico puede presentar falta de estabilidad. Para obviar este problema, no se opera con la lectura obtenida directamente sobre el suelo, sino con la relación entre la misma y la lectura hecha sobre un bloque standar, antes de proceder al ensayo de campo.
- Si el asiento del aparato no es perfecto, el detector medirá la densidad ponderada del suelo y del volumen de aire interpuesto entre él y el aparato.
- El número de cuentas por minuto detectadas en una medida, varía de forma estadística, con una cierta desviación típica. Cuanto menor sea el tiempo de medida, la desviación típica será mayor.

Se ha desarrollado también un aparato llamado de «doble sonda», en el que tanto la fuente como el detector se pueden introducir en taladros a la profundidad deseada. Tiene especial aplicación en tramos de ensayo, para medir el gradiente de densidad hasta el fondo de capa.

Medida de la humedad. Cuando una radiación de neutrones rápidos penetra en el suelo, también se produce su colisión

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

sión con los átomos de aquél, pero en este caso, los neutrones pierden gran parte de su energía precisamente al chocar con los átomos de hidrógeno que encuentran en su trayectoria, mientras que no la pierden en su encuentro con otros átomos cuyo núcleo tiene una masa atómica superior.

El sistema de medida es el de *retrodispersión* (fig. 58). La fuente, a nivel de la superficie, emite la radiación de neutrones rápidos y un detector de neutrones lentos registra el número de aquéllos que le llegan habiendo perdido la mayor parte de su energía en el choque con átomos de hidrógeno del suelo. Por consiguiente, lecturas más elevadas representan un mayor contenido de agua en el suelo, como se ve en la forma de la curva de calibración.

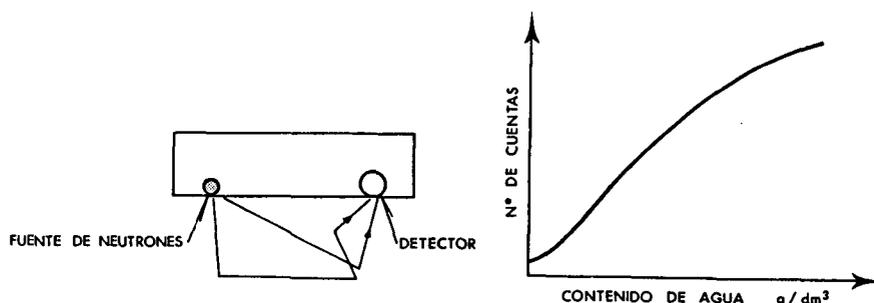


FIGURA 58

En la medida de la humedad influyen las mismas *causas de error* señaladas para la medida de densidad, añadiéndose una más. El aparato mide el contenido de hidrógeno, mientras que el objetivo del ensayo es medir el agua que contiene el suelo, es decir, aquélla que se pone de manifiesto al secar el suelo en estufa a 105° de temperatura.

Si el suelo contiene materia orgánica o un tipo de arcilla que no libera todo el agua que contiene en el secado a estufa, y la calibración se ha hecho con otro suelo, los errores pueden ser notables.

3.2.2. Medida de la deformabilidad del suelo.

Como ya hemos visto en la Sección 1.ª, las cualidades resistentes de un suelo guardan estrecha relación con su densidad seca y su estado de humedad. Así como los ensayos de resistencia a esfuerzo cortante son poco adaptables al control de campo, salvo el de penetración CBR empleado en ocasiones en ensayos *in situ*, la resistencia del suelo a la deformación, sí tiene plena aplicación como ensayo de control. Los procedimientos de medida pueden resumirse esencialmente en dos:

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

- a.—Aplicación estática de una carga variable y determinación del módulo de deformación.
- b.—Aplicación de una carga circulante y medida de la deformación elástica o residual.

a) Módulo de deformación.

Si una capa de suelo se somete a una sucesión de cargas crecientes, aplicadas en un punto de su superficie a través de una placa rígida circular, y se registran las deformaciones o asientos correspondientes a las presiones ejercidas, la pendiente de la curva obtenida, presiones-deformaciones, define el módulo de deformación del suelo.

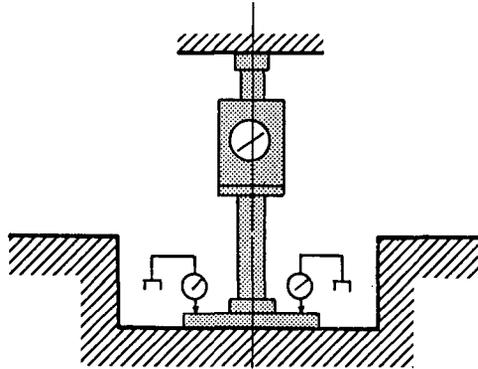


FIGURA 60

En el ensayo de la placa (fig. 60) las cargas se aplican mediante un gato provisto de manómetro, que actúa contra un dispositivo de reacción, generalmente constituido por la viga-puente trasera de un camión suficientemente cargado. Los asientos de la placa se miden mediante comparadores graduados en 1/100 mm, en general en número de tres, cuyos palpadores se apoyan directamente sobre la placa. Están montados sobre un puente triangular, cuyos apoyos se alejan suficientemente del punto de ensayo, y que sirve de plano de referencia para la medida de los asientos.

El tamaño de la placa, desde unos 15 a 75 cm de diámetro, afecta a su propia rigidez, a la facilidad de su manejo, y determina la carga total a aplicar por el gato para una misma presión unitaria sobre el terreno. Desde este punto de vista son preferibles las placas de diámetro pequeño. Sin embargo, si hay elementos gruesos en el suelo, o si se quiere incluir el efecto de capas más profundas, se utilizan las placas de mayor tamaño.

Por otra parte, la forma de aplicación de las cargas y el escalonamiento de las mismas, tiene también su influencia en el módulo resultante. Todo ello hace necesario especificar, en cada caso, el método de ensayo y de cálculo utilizado. Dos

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

son los principales *métodos operativos* que se utilizan en los países europeos, el suizo y el alemán. En ambos, como en cualquier otro ensayo de medida de resistencia de un suelo, los resultados son representativos sólo en las *condiciones de humedad* presentes en el suelo. En especial si éste es cohesivo, el módulo puede resultar anormalmente alto, si la humedad es baja; se considera que debe ser del orden de un 2% por encima de la humedad óptima Proctor.

En el *método suizo*, se realiza un único ciclo de carga, sobre placas de 200, o más frecuentemente, de 700 cm² (15,96 ó 29,85 cm de diámetro respectivamente). Las cargas se aplican en escalones sucesivos de 0,5 kg/cm² hasta una presión mínima de 2,5 kg/cm². No se pasa a un escalón superior hasta que en el anterior la deformación, en un intervalo de 3 ó de 2 minutos, según el suelo sea o no cohesivo, no supere 0,05 mm.

El *valor del módulo* se calcula mediante la fórmula $D \times p / s$, donde D es el diámetro de la placa y los incrementos de presión y de asientos son los registrados en el intervalo de presiones 0,5 a 1,5 kg/cm².

En el *método alemán*, más elaborado que el suizo, se realizan dos ciclos de carga y descarga, y se utilizan placas de 30 cm o, en caso de suelos con elementos gruesos, de 60 cm de diámetro.

Las cargas, en el primer ciclo, se aplican en escalones mantenidos hasta una estabilización de 0,02 mm de asiento en un minuto. La carga máxima (Fig. 61) se fija como aquella que da un asiento aproximado de 2 mm, para la placa de 30 cm de diámetro. El valor del módulo E_1 se calcula mediante la fórmula $0,75 D \times \Delta p / \Delta s$, tomando los incrementos de presión y de deformación correspondientes al 30% y 70% de la carga máxima.

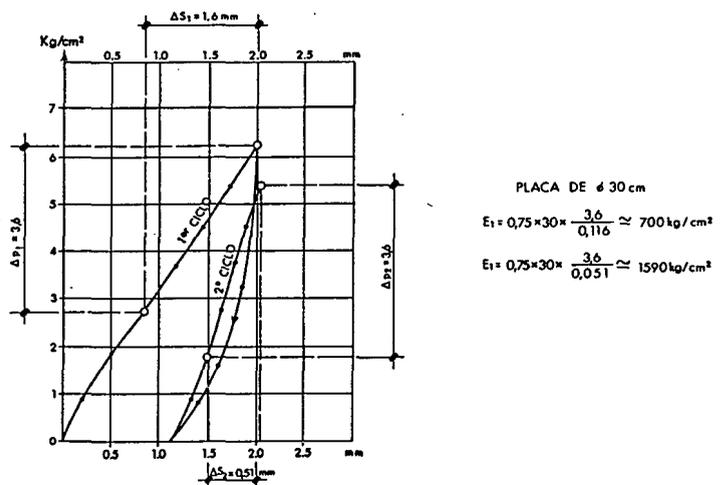


FIGURA 61

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

Después de la descarga, efectuada en escalones, reduciendo cada vez la mitad de la carga hasta llegar a cero, quedará una deformación remanente y al cargar de nuevo no debe sobrepasarse el penúltimo escalón del primer ciclo, con el fin de permanecer dentro de la zona precargada.

La curva del segundo ciclo se aproxima mucho más a una recta, lo que hace más segura la determinación de E_2 . La relación E_2/E_1 , es un índice de la compactación recibida por el suelo en el primer ciclo de carga. Un valor elevado indicará insuficiente compactación inicial, causa de un módulo E_1 reducido. Debido a ello no basta que se alcance un valor mínimo de E_2 , representativo de la deformabilidad del suelo compactado, sino que es preciso que también el módulo en el primer ciclo de carga haya sido suficientemente alto o, lo que es lo mismo, que la relación E_2/E_1 no supere un cierto valor, por lo general 2,0 en suelos cohesivos y 2,2 a 2,5 en los granulares.

b) Deformación al paso de cargas. Un vehículo cargado que circula sobre una capa de suelo, produce bajo sus ruedas una deformación cuya magnitud está ligada al grado de compactación del suelo. Puede distinguirse tres procedimientos de evaluación de la deformación:

a.—*Estimación visual*, al paso de la carga.

b.—*Medida de la deformación elástica* o deflexión bajo una rueda.

c.—*Medida del asiento* al paso de la rueda.

En el *primer procedimiento* puede utilizarse un camión cargado al que se hace circular a una velocidad de 30 a 60 metros/minuto, observando las zonas en las que la deflexión es excesiva, por comparación con las zonas bien compactadas que no presentan visualmente ninguna deformación.

La misma prueba puede efectuarse con un *supercompactador*, a cuyo paso se detectan las zonas inestables, con una profundidad de influencia más elevada, en general superior a 1,00 metro. Es fundamental tener en cuenta el estado de humedad del suelo; si está demasiado seco, el paso de cargas no detectará las zonas de baja densidad.

En el *segundo procedimiento*, se emplean los medios de medida de la deflexión elástica, bien la viga Benkelman o el deflectógrafo Lacroix. Estos ensayos, sin embargo, son de realización y de interpretación laboriosa, lo que los hace poco aceptables al control de obras de tierra y se reservan, en general, para el de firmes. En ocasiones se aplican al control de la explanada, considerándose que una deflexión superior a 3 mm no permitirá la compactación satisfactoria de la primera capa del firme.

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

Por último, el *método de la medida del asiento* al paso de una rueda cargada, ha sido normalizado como ensayo de control en Suiza, para el caso de suelos con elevados porcentajes de partículas gruesas (60 % superior a 7 mm), en los cuales el control basado en la densidad Proctor es menos fiable. Consiste en nivelar 10 puntos alineados, espaciados 1,00 metro entre sí, antes y después del paso de la rueda gemela de un eje de 10 toneladas, tomando el valor medio de las deformaciones. El ensayo debe realizarse cuando el suelo tiene una humedad del 2 % por encima de la óptima, y se considera admisibles, deformaciones de 5 mm para el núcleo de un terraplén y de 3 mm para la coronación.

3.2.3 Medida de la compactación en pedraplenes.

Tanto la medida del porcentaje de compactación como la medida de la deformabilidad, son de aplicación al caso de los pedraplenes, con las naturales adaptaciones debidas al máximo tamaño del material empleado en su construcción.

Porcentaje de compactación. El procedimiento consiste en excavar un pozo, con la profundidad de la tongada extendida y diámetro aproximado al espesor de la misma, revestir las paredes y fondo con una lámina de plástico resistente, y rellenar el pozo con agua para medir su volumen.

El material extraído se pesa en húmedo, y se toman varias muestras de la fracción más menuda, por ejemplo inferior a 80 mm, para determinar su contenido de humedad, adoptando el valor medio. De este modo podremos conocer el peso seco y por tanto, a través del volumen del pozo, la densidad seca de la tongada.

La particularidad del caso de pedraplén, sin embargo, estriba en que no dispondremos de una densidad de referencia similar a la densidad Proctor para suelos, con la cual comparar la obtenida in situ. En su lugar, lo que sí puede calcularse es el porcentaje de huecos en la tongada compactada, bastando para ello conocer el peso específico medio del material empleado en el pedraplén. Como sabemos (Secc. I), el índice de huecos totales se calcula mediante la relación: $e = G/D_s - 1$.

Lógicamente, el procedimiento no se adapta al control de rutina de la compactación de un pedraplén, dada su laboriosidad y el tiempo necesario para su realización. Sí es de aplicación, en cambio, en tramos de ensayo, para fijar los parámetros de la ejecución, comparando entre sí los diferentes índices de huecos obtenidos, y su aproximación al 30 % máximo exigido por las Normas (PG-3/75).

EL CONTROL DE LA COMPACTACION

Medida de la deformabilidad. La determinación de la deformabilidad como medida de la compactación de un pedraplén, puede referirse, bien sea al *asiento* experimentado al compactar o bien al *módulo de deformación* finalmente conseguido.

En lo que se refiere al primero, el procedimiento consiste simplemente en establecer, sobre la superficie extendida, unos puntos de medida mediante referencias fijas y determinar su cota topográfica antes y después de compactar. El método es de aplicación, sobre todo, a tramos de ensayo, pudiéndose estudiar la evolución del valor del asiento en función del número de pasadas, para diferentes condiciones de espesores y humedades.

En cuanto a la determinación del módulo de deformación, se trata de un procedimiento en todo similar al descrito para el caso de suelos, sin más particularidad que el tamaño de la placa a emplear, que debe ser al menos de 60 cm o incluso, de 75 cm de diámetro, para obtener resultados representativos. Ello significa, dada la superficie de carga, elevados valores de la fuerza total a aplicar por lo que, en general, se limita el ensayo al escalón de 0,5 - 1,5 kg/cm², suficiente, por otra parte, para capas de núcleo en las que el pedraplén tiene su aplicación.

APENDICE

**A. TABLA DE VALORES DENSIDAD
SECA-HUMEDAD DE SATURACION
(CURVAS DE SATURACION)**

TABLA DE VALORES

A. TABLA DE VALORES. DENSIDAD SECA - % HUMEDAD DE SATURACION (CURVAS DE SATURACION)

Peso Especifico

| Densidad Seca | 2.50 | 2.52 | 2.54 | 2.56 | 2.58 | 2.60 | 2.62 | 2.64 | 2.66 | 2.68 | 2.70 | 2.72 | 2.74 | 2.76 | 2.78 | 2.80 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.25 | 40.0 | 40.3 | 40.6 | 40.9 | 41.2 | 41.5 | 41.8 | 42.1 | 42.4 | 42.7 | 43.0 | 43.2 | 43.5 | 43.8 | 44.1 | 44.3 |
| 1.30 | 36.9 | 37.2 | 37.6 | 37.9 | 38.1 | 38.4 | 38.7 | 39.0 | 39.3 | 39.6 | 39.9 | 40.2 | 40.4 | 40.7 | 41.0 | 41.2 |
| 1.35 | 34.1 | 34.4 | 34.7 | 35.0 | 35.3 | 35.6 | 35.9 | 36.2 | 36.5 | 36.8 | 37.0 | 37.3 | 37.6 | 37.8 | 38.1 | 38.4 |
| 1.40 | 31.4 | 31.7 | 32.1 | 32.4 | 32.7 | 33.0 | 33.3 | 33.6 | 33.8 | 34.1 | 34.4 | 34.7 | 34.9 | 35.2 | 35.5 | 35.7 |
| 1.45 | 29.0 | 29.3 | 29.6 | 29.9 | 30.2 | 30.5 | 30.8 | 31.1 | 31.4 | 31.7 | 31.9 | 32.2 | 32.5 | 32.7 | 33.0 | 33.3 |
| 1.50 | 26.7 | 27.0 | 27.3 | 27.6 | 27.9 | 28.2 | 28.5 | 28.8 | 29.1 | 29.4 | 29.6 | 29.9 | 30.2 | 30.4 | 30.7 | 31.0 |
| 1.55 | 24.5 | 24.8 | 25.1 | 25.5 | 25.8 | 26.1 | 26.3 | 26.6 | 26.9 | 27.2 | 27.5 | 27.8 | 28.0 | 28.3 | 28.5 | 28.8 |
| 1.60 | 22.5 | 22.8 | 23.1 | 23.4 | 23.7 | 24.0 | 24.3 | 24.6 | 24.9 | 25.2 | 25.5 | 25.7 | 26.0 | 26.3 | 26.6 | 26.8 |
| 1.65 | 20.6 | 20.9 | 21.2 | 21.5 | 21.8 | 22.1 | 22.4 | 22.7 | 23.0 | 23.3 | 23.6 | 23.8 | 24.1 | 24.4 | 24.6 | 24.9 |
| 1.70 | 18.8 | 19.1 | 19.5 | 19.8 | 20.1 | 20.4 | 20.7 | 20.9 | 21.2 | 21.5 | 21.8 | 22.1 | 22.3 | 22.5 | 22.8 | 23.1 |
| 1.75 | 17.1 | 17.5 | 17.8 | 18.1 | 18.4 | 18.7 | 19.0 | 19.3 | 19.5 | 19.8 | 20.1 | 20.4 | 20.6 | 20.9 | 21.2 | 21.4 |
| 1.80 | 15.6 | 15.9 | 16.2 | 16.5 | 16.8 | 17.1 | 17.4 | 17.7 | 18.0 | 18.2 | 18.5 | 18.8 | 19.1 | 19.3 | 19.5 | 19.3 |
| 1.85 | 14.1 | 14.4 | 14.7 | 15.0 | 15.3 | 15.6 | 15.9 | 16.2 | 16.5 | 16.7 | 17.0 | 17.3 | 17.6 | 17.8 | 18.1 | 18.3 |
| 1.90 | 12.6 | 12.9 | 13.3 | 13.6 | 13.9 | 14.2 | 14.5 | 14.8 | 15.0 | 15.3 | 15.6 | 15.9 | 16.1 | 16.4 | 16.7 | 16.9 |
| 1.95 | 11.3 | 11.6 | 11.9 | 12.2 | 12.5 | 12.8 | 13.1 | 13.4 | 13.7 | 14.0 | 14.2 | 14.5 | 14.8 | 15.1 | 15.3 | 15.6 |
| 2.00 | 10.0 | 10.3 | 10.6 | 10.9 | 11.2 | 11.5 | 11.8 | 12.1 | 12.4 | 12.7 | 13.0 | 13.2 | 13.5 | 13.8 | 14.0 | 14.3 |
| 2.05 | 8.8 | 9.1 | 9.4 | 9.7 | 10.0 | 10.3 | 10.6 | 10.9 | 11.2 | 11.5 | 11.7 | 12.0 | 12.3 | 12.5 | 12.8 | 13.1 |
| 2.10 | 7.6 | 7.9 | 8.2 | 8.5 | 8.8 | 9.1 | 9.4 | 9.7 | 10.0 | 10.3 | 10.6 | 10.9 | 11.1 | 11.4 | 11.6 | 11.9 |
| 2.15 | 6.5 | 6.8 | 7.1 | 7.4 | 7.7 | 8.0 | 8.3 | 8.6 | 8.9 | 9.2 | 9.5 | 9.7 | 10.0 | 10.3 | 10.5 | 10.8 |
| 2.20 | 5.5 | 5.8 | 6.1 | 6.4 | 6.7 | 7.0 | 7.3 | 7.6 | 7.9 | 8.1 | 8.4 | 8.7 | 8.9 | 9.2 | 9.5 | 9.7 |
| 2.25 | 4.4 | 4.8 | 5.1 | 5.4 | 5.7 | 6.0 | 6.3 | 6.6 | 6.9 | 7.1 | 7.4 | 7.7 | 7.9 | 8.2 | 8.5 | 8.7 |

B. TABLA DE CARACTERISTICAS DE COMPACTADORES VIBRATORIOS

TABLA DE CARACTERISTICAS

B. TABLA DE CARACTERISTICAS DE COMPACTADORES VIBRATORIOS

| Marca | Modelo | Peso total T. | Ancho de Trabajo M | Carga Unitaria Kg/cm | Frecuencia C.P.M. | Amplitud Nominal MM. | Tipo de Cilindro L: Liso P: Patas |
|---|-----------|---------------|--------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---|
| 1. MONOCILINDRICOS REMOLCADOS | | | | | | | |
| ABG | SAW 186 | 16,5 | 2,04 | 76,0 | 1.400 | | |
| DYNAPAC | CH-47 | 5,9 | 1,90 | 31,0 | 1.600 | 1,5 | L |
| | CK-51 | 10,0 | 2,13 | 46,9 | 1.500 | 1,8 | L |
| | CH-61 | 15,0 | 2,13 | 70,4 | 1.500 | 2,1 | L |
| | CF-47 | 6,1 | 1,90 | 32,0 | 1.600 | 1,5 | P |
| LEBRERO | CF-51 | 9,8 | 2,13 | 46,0 | 1.500 | 1,8 | P |
| | RV-60 | 4,2 | 1,50 | 28,0 | 2.000 | | L/P |
| | RV-80 | 6,0 | 1,80 | 33,3 | 1.500 | | L/P |
| | RV-111 | 7,0 | 1,80 | 38,5 | 1.470 | | L/P |
| | RV-121 | 8,0 | 2,00 | 47,4 | 1.450 | | L/P |
| SCHEID | RV-141 | 13,8 | 2,11 | 65,8 | 1.430 | | L/P |
| | CV-80 | 7,8 | 2,00 | 39,0 | | | L |
| VIBROMAX | CV-80 | 8,0 | 2,00 | 40,0 | | | P |
| | W-501 | 3,9 | 1,83 | 21,3 | 2.300 | 1,35 | L |
| | W-651 | 6,3 | 2,10 | 30,0 | 2.400 | 1,35 | L |
| | W-651.S | 6,5 | 2,10 | 31,0 | 2.400 | 1,35 | P |
| 2. MONOCILINDRICOS AUTOPROPULSADOS | | | | | | | |
| ABG | PUMA 168 | 7,9 | 1,65 | 47,9 | 3.000 | | |
| | PUMA 179 | 11,2-12,0 | 2,10 | 53,3/57 | 1.750 | | |
| | PUMA 181 | 14,5 | 2,10 | 69,0 | 1.750 | | |
| | ALPHA 190 | 9,7/11,1 | 2,10 | 26,7-31,9 | 1.750/2.400 | 1,67/0,65 | L/P |
| | ALPHA 194 | 13,6/13,9 | 2,10 | 40,0 | 1.750/2.400 | 1,77/0,62 | L/P |
| ALBARET | ALPHA 196 | 17,6/17,8 | 2,10 | 50,0 | 1.750/2.400 | 1,75/0,61 | L/P |
| | VA-10 | 8,2 | 1,40 | 28,5 | 2.520 | | L |
| | VA-12 | 8,7 | 1,70 | 27,0 | 2.520 | 0,29/11 | L |
| | VA-15 | 11,0 | 2,10 | 27,0 | 2.520 | | L |
| | VM-1203 | 14,2 | 2,20 | 37,0 | 1.980 | | L |
| BOMAG | VM-1204 | 15,7 | 2,20 | 46,0 | 1.980 | | L |
| | 212 | 8,85 | 2,10 | 24,7 | 1.800 | 1,70/1,50 | L |
| | 212 D | 10,0 | 2,10 | 30,0 | 1.800 | 1,70/1,50 | L |
| | 212 PD | 10,65 | 2,10 | 29,2 | 1.800 | 1,70/1,50 | P |
| | 213 | 9,40 | 2,10 | 24,1 | 1.800 | 1,70/1,50 | L |
| | 213 D | 10,47 | 2,10 | 29,7 | 1.800 | 1,70/1,50 | L |
| CATERPILLAR | 213 PD | 11,10 | 2,10 | 31,7 | 1.800 | 1,70/1,50 | P |
| | CS-551 | 10,4 | 2,13 | 27,0 | 1.500/1.800 | 1,4 | L |
| | CS-553 | 10,8 | 2,13 | 29,0 | 1.500/1.800 | 1,3 | L |
| | CS-643 | 14,9 | 2,20 | 39,0 | 1.500/1.950 | 0,61/1,22 | L |
| | CS-653 | 17,1 | 2,20 | 46,8 | 1.500/1.950 | 1,5 | L |
| | CP-553 | 12,3 | 2,13 | 36,5 | 1.500/1.800 | 1,3 | P |
| | CP-643 | 16,3 | 2,20 | 45,5 | 1.500/1.950 | 1,06/0,43 | P |
| | CP-653 | 18,5 | 2,20 | 53,2 | 1.500/1.950 | 1,06/0,43 | P |
| DYNAPAC | CA-15 | 6,6/7,75 | 1,67 | 17,4/21,0 | 1.750/2.400 | 1,6/0,4 | L/P |
| | CA-25 | 10,4/12,1 | 2,13 | 25,3/32,9 | 1.500/2.400 | 1,7/0,4 | L/P |
| | CA-30 | 12,5/13,1 | 2,13 | 34,0/35,6 | 1.500/1.740 | 1,7/0,8 | L/P |
| | CA-51 | 14,7/14,8 | 2,13/2,54 | 40,2/47,9 | 1.500 | 1,8/1,0 | L/P |

TABLA DE CARACTERISTICAS

| Marca | Modelo | Peso total T. | Ancho de Trabajo M | Carga Unitaria Kg/cm | Frecuencia C.P.M. | Amplitud Nominal MM. | Tipo de Cilindro L: Liso P: Patas |
|---|------------|---------------|--------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---|
| MONOCILINDRICOS AUTOPROPULSADOS (CONT.) | | | | | | | |
| HAMM | HW-2301 S | 7,8 | 1,90 | 22,0 | 1.800/3.000 | | L/P |
| | 2410 S | 10,3 | 2,10 | 25,0 | 1.800 | 1,7 | L/P |
| | 2411 S | 10,4 | 2,10 | 25,5 | 1.800/2.500 | 1,7/0,7 | L/P |
| | 2411 SD | 10,9 | 2,10 | 26,7 | 1.800/2.500 | 1,7/0,7 | L/P |
| INGERSOLL | SP-48 | 6,5/7,5 | 1,68 | 38,7/44,6 | 1.850 | 1,5/0,8 | L/P |
| | SP-56 | 8,9/10,2 | 2,13 | 41,8 | 1.825 | 1,3/1,1 | L/P |
| | SP-56 DH | 13,9/14,2 | 2,13 | 65,2/66,7 | 1.525 | 1,4 | L/P |
| | SP-60 | 17,1/18,9 | 2,54 | 67,3/74,4 | 1.525 | 1,5 | L/P |
| LEBRERO | RAHILE 130 | 10,0 | 1,90 | 32,0 | 2.250 | | L/P |
| | RAHILE 125 | 10,6/12,1 | 1,90/2,05 | 33,7/33,2 | 1.700/2.050 | 1,5/0,4 | L/P |
| | RAHILE 120 | 13,0 | 2,18 | 35,0 | 2.000 | | L/P |
| | RAHILE 135 | 13,0/13,3 | 2,18 | 35,1/39,5 | 1.650/2.100 | 1,9/0,6 | L/P |
| SCHEID | RAHILE 180 | 17,8 | 2,15 | 57,0 | 1.600 | 2,0/0,7 | L/P |
| | PV-45 | 11,5 | 2,00 | 24,2 | 1.800 | 1,75 | L |
| | PV-50 | 13,0 | 2,15 | 24,6 | 1.680/2.160 | 1,6/0,6 | L/P |
| | PV-60 | 13,9 | 2,54 | 25,7 | 1.600/2.000 | 1,3/0,7 | L |
| VIBROMAX | PV-70 | 14,1 | 2,20 | 31,6 | 1.800/3.000 | 1,6/0,3 | L/P |
| | W-602 | 6,5/7,7 | 1,75 | 18,3/24,0 | 1.740/3.000 | 1,6/0,3 | L/P |
| | W-1102 | 11,7/13,7 | 2,15 | 25,1/30,4 | 1.680/2.400 | 1,6/0,4 | L/P |
| | W-1601 | 16,2 | 2,15 | 48,4 | 1.500 | 2,0 | L/P |
| Zts | W-1801 | 17,8 | 2,15 | 48,4 | 1.600 | 2,0 | L/P |
| | V V-110 | 11,3 | 2,20 | 27,3 | 1900/2340 | 1,4/0,7 | L |

| Marca | Modelo | Peso Total T. | Ancho de trabajo M. | Carga Unitaria Kg/cm | Peso por rueda T. | Frecuencia C.P.M. | Amplitud Nominal M.M. | N.º de Ruedas |
|--|------------|---------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------------|
| 3. MONOCILINDRICOS MIXTOS: CILINDRO + NEUMATICOS | | | | | | | | |
| ABG | ALEXANDER | 8,5 | 1,65 | 34,7 | 1,0 | 3.000 | | 5 |
| ALBARET | VA 12-DC | 13,4 | 1,70 | 27,0 | 3,0 | 1.560/2.520 | 0,6/0,3 | 3 |
| CATERPILLAR | CB-525 | 13,2 | 1,70 | 26,0 | 3,0 | 1.560/2.400 | 0,9/0,5 | 3 |
| DYNAPAC | CG-15 C | 4,3 | | | | | | 4 |
| HAMM | DV-6K | 7,2 | 1,40 | | | 2.520/3.000 | | 4 |
| | DV-8 K | 9,1 | 1,60 | | | 2.520/3.000 | | 4 |
| | DV-10 K | 10,8 | 1,75 | | | 2.520/3.000 | | 4 |
| LEBRERO | RAHILE 152 | 15,6 | 2,35 | 29,7 | 2,0 | 1.500/1.980 | | 4 |
| 4. TIPO TANDEM (más de 8 T) | | | | | | | | |
| ALBARET | VA-10 | 9,0 | 1,40 | 32,0 | — | 1.560/2.520 | 1,1/0,3 | — |
| | VA-12 | 9,5 | 1,70 | 28,0 | — | 1.560/2.520 | 1,1/0,3 | — |
| | VA-15 | 13,0 | 2,10 | 31,0 | — | 2.220 | | — |
| BOMAG | BW-160 AD | 8,5 | 1,68 | 25,7 | — | 1.800/2.700 | 1,0/0,5 | — |
| | BW-201 AD | 10,1 | 2,13 | 24,3 | — | 2.700 | 0,6/0,4 | — |
| | BW-220 AD | 12,6 | 2,03 | 31,4 | — | 2.400 | | — |
| | BW-216 AD | 20,0 | 2,10 | 50,0 | — | | | — |
| DYNAPAC | CC-42 | 9,8 | 1,68 | 30,0 | — | 2.500 | | — |
| | CC-50 | 13,3 | 2,13 | 31,2 | — | 1.700 | | — |

TABLA DE CARACTERISTICAS

| Marca | Modelo | Peso Total T. | Ancho de Trabajo M. | Carga Unitaria Kg/cm | Frecuencia C.P.M. | Amplitud Nominal MM. |
|---------------------|----------|---------------|---------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| TIPO TANDEM (Cont.) | | | | | | |
| HAMM | DV-8 | 8,8 | 1,60 | 28,8 | 3.000 | |
| | DV-10 | 10,3 | 1,75 | 30,6 | 3.000 | |
| INGERSOLL | DA-50 | 10,0 | 1,90 | 26,3 | 2.400 | 0,9/0,4 |
| LEBRERO | AVTA-75 | 8,1 | 1,40 | 27,9-29,7 | 1.900/3.000 | 1,4/0,6 |
| | AVTA-105 | 10,5 | 1,80 | 30,9-32,0 | 1.900/3.000 | 1,4/0,6 |
| SCHEID | DV-80 | 8,5 | 1,40 | 28,0-32,0 | 3.000 | 0,8/0,3 |
| VIBROMAX | W-752 | 8,4 | 1,60 | 26,8 | 3.000 | |
| | W-852 | 9,0 | 1,60 | 27,9 | 3.000 | |
| | W-854 | 9,0 | 1,60 | 27,9 | 3.000 | |

Nota: La Tabla precedente no pretende ser exhaustiva y en ella se recogen únicamente los datos más característicos que se han podido extraer de los Catálogos de fabricantes de compactadores.

**C. NORMAS DE REALIZACION DE
ENSAYOS PARA LA MEDIDA DE
LA COMPACTACION DE SUELOS**

Humedad mediante secado en estufa (NLT-102/72)

1. Objeto

1.1. En esta norma se describe la manera de determinar la humedad de un suelo o roca mediante secado en estufa.

1.2. Se denomina «humedad» al cociente entre la masa del agua que pierde un suelo al secarlo y la masa del suelo seco.

1.3. Como temperatura convencional de secado se toma en la mayoría de los suelos y rocas la de 105-110°C. El secado deberá prolongarse hasta pesada constante.

2. Aparatos y material necesarios

2.1. Una balanza que aprecie 0,01 g. para muestras de masa igual o inferior a 100 g. una balanza que aprecie 0,1 g. para muestras cuya masa oscile entre 100 y 1000 g. o una balanza que aprecie 1 g. para muestras de masa superior a 1000 g.

2.2. Una estufa que mantenga la temperatura entre 105 y 110°C para muestras normales y entre 40 y 50 °C para muestras yesíferas.

2.3. Recipientes adecuados, hechos de material resistente a la corrosión, y cuya masa no cambie con repetidos calentamientos y enfriamientos. Deben tener tapas que cierren bien para evitar las pérdidas de humedad de las muestras antes de la pesada inicial y para evitar la absorción de humedad de la atmósfera tras el secado y antes de la pesada final.

2.4. Pinzas para manipular los recipientes calientes.

3. Procedimiento.

3.1. Se selecciona una cantidad representativa de suelo húmedo según se señale en cada norma de ensayo que precise una determinación de humedad. Si no se indica cantidad, la masa mínima de suelo será la siguiente:

| Tamaño máximo de partículas | Masa mínima de muestra (g) |
|----------------------------------|----------------------------|
| 0,40 UNE (A.S.T.M., núm 40) | 10 |
| 5 UNE (A.S.T.M., núm. 4) | 100 |
| 12,5 UNE (A.S.T.M., 1/2 pulgada) | 300 |
| 25 UNE (A.S.T.M., 1 pulgada) | 500 |
| 50 UNE (A.S.T.M., 2 pulgadas) | 1000 |

3.2. Se pesa un recipiente limpio y seco con su tapa (M_1).

3.3. Se coloca la muestra para la humedad en dicho recipiente, se ajusta la tapa inmediatamente y se pesa en seguida el conjunto (M_2).

3.4. Se quita la tapa y se coloca el recipiente con la muestra húmeda en la estufa, mantenida a una temperatura de 105-110°C, y se seca hasta pesada constante.

3.5. Inmediatamente después de secar la muestra de la estufa, se vuelve a colocar la tapa y se permite que la muestra se enfríe hasta la temperatura ambiente.

3.6. En cuanto se enfríe la muestra, se pesa el recipiente con la tapa y la muestra seca (M_3).

4. Resultados

4.1. El tanto por ciento de Humedad viene dado por la expresión:

$$w = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \times 100$$

5. Observaciones

5.1. Apartado 1.3. El tiempo necesario para llegar a pesada constante depende del tipo de suelo y del tamaño de la muestra. Normalmente, 18 horas es suficiente para cualquier tipo de suelo.

Cuando se trata de suelos poco plásticos, el tiempo preciso suele ser bastante menor.

En suelos que contienen yeso se recomienda emplear una temperatura de $45 \pm 5^\circ\text{C}$ para evitar que desaparezca agua combinada.

5.2. Apartado 2.3. Se puede usar un recipiente sin tapa, si se pesa la muestra húmeda inmediatamente después de colocada en el recipiente y si se pesa la muestra seca inmediatamente después de sacarla de la estufa o tras haberse enfriado en un desecador.

5.3. Es conveniente no colocar muestras húmedas de gran tamaño en una estufa en la que hay muestras secas, pues éstas podrían absorber humedad de las anteriores.

6. Correspondencia con otras normas

A.S.T.N. D-2216-66.

**Humedad de un
suelo por el pro-
cedimiento del
alcohol
NLT-103/72**

1. Objeto

1.1. En esta norma se describe la manera de determinar la humedad de un suelo, con rapidez y un mínimo de equipo.

2. Aparatos y material necesarios.

2.1. Un plato de aluminio con mango aislante largo.

- 2.2. Una espátula con mango aislante largo.
- 2.3. Una balanza de 0,1 g de sensibilidad y unos 1000 g de capacidad en un platillo.
- 2.4. Alcohol de quemar.

3. Procedimiento

- 3.1. Pesar juntos el plato y la espátula (t).
- 3.2. Tomar unos 200 g de suelo a ensayar, ponerlos en el plato y pesar el conjunto incluyendo la espátula ($t + s + a$).
- 3.3. Poco a poco y amasando con la espátula, añadir al suelo unos 50 cm³ de alcohol; acto seguido se prende fuego moviendo la mezcla continuamente con la espátula; cuando se haya consumido el fuego, dejar enfriar y pesar otra vez el conjunto (no olvidar fuera la espátula).
- 3.4. Se repite el proceso hasta llegar a peso de constante ($t + s$). Normalmente, dos o tres veces son suficientes.

4. Resultados

- 4.1. El tanto por ciento de humedad viene dado por la expresión:

$$h = \frac{(t + s + a) - (t + s)}{(t + s) - t} \times 100$$

5. Observaciones

5.1. Apartado 3.2. Aunque 200 g es una cantidad muchas veces valedera, la cantidad de muestra a utilizar en cada caso particular depende de la uniformidad con que el agua y el suelo están mezclados y del tamaño de las partículas mayores. Con respecto a éste, debe seguirse lo establecido en la norma NLT-102/72, apartado 3.1.

5.2. Apartado 3.3. El incluir la espátula en las pesadas, tiene por objeto incluir también el material que queda fuertemente adherido a ella una vez seco, ahorrándose de esta forma el tener que limpiarla cada vez.

5.3. Apartado 3.4. El número de veces que hay que quemar el suelo depende de su clase; cuanto más arcilloso, más veces habrá de repetirse el proceso.

5.4. Si el suelo contiene una cantidad elevada de materia orgánica, yeso o incluso carbonatos, los resultados obtenidos, siguiendo este método, pueden ser erróneos. Lo mismo en estos casos, que cuando se trate de suelos dudosos de cualquier tipo, es conveniente hacer unos ensayos comparativos con el método de la estufa (NLT-102/72).

Apisonado proctor NLT-107/76

6. Correspondencia con otras normas

BS 1377-1(C).

1. Objeto

1.1. El ensayo de apisonado Proctor tiene por objeto determinar en un suelo la relación entre la humedad y la densidad seca obtenida cuando es compactado en las condiciones establecidas en esta Norma.

2. Aparatos y material necesarios

2.1. Un molde cilíndrico de metal de $1.000 \pm 9 \text{ cm}^3$ de capacidad ($102 \pm 0,4 \text{ mm}$ de diámetro interior y $122,4 \pm 0,1 \text{ mm}$ de altura), con su base y collar (fig. 1). El molde puede ser de una pieza, como el de la figura, o partido longitudinalmente para desmoldear con mayor facilidad.

2.2. Una maza metálica de base circular de $2,50 \pm 0,01 \text{ kg}$ adaptada al interior de una guía tubular adecuada para que su altura de caída libre sea de $305 \pm 2 \text{ mm}$. La base de la maza tendrá un diámetro de $50 \pm 0,2 \text{ mm}$. La guía debe tener, a dos centímetros de cada extremo, 4 orificios de 1 cm de diámetro, espaciados 90° , para facilitar la entrada o salida del aire. La separación entre maza y guía debe ser la suficiente para que la caída sea libre.

También se puede utilizar una maza automática que distribuya los golpes uniformemente sobre la superficie del material. Sin embargo, sólo se considerarán aceptables aquellos modelos con los que se haya comprobado experimentalmente que los resultados obtenidos son los mismos, a los efectos prácticos perseguidos, que con la maza manual. La utilización de una maza diferente a la manual normalizada deberá hacerse constar en la hoja de resultados.

2.3. Una balanza de unos 20 kg y otra de unos 1.000 g de capacidad, cuyo error en la pesada sea inferior a 1 g y $0,1 \text{ g}$ respectivamente.

2.4. Recipientes adecuados para la determinación de humedad, como se indica en el apartado 2.3 de la norma NLT-102/72.

2.5. Una estufa de desecación regulable a $105-110^\circ\text{C}$.

2.6. Una amasadora mecánica adecuada, o instrumentos diversos para amasar manualmente (recipiente, guantes de goma, etc.).

2.7. Un tamiz 20 UNE (A.S.T.M. $3/4$ pulgada) y otro 5 UNE (A.S.T.M. núm. 4).

- 2.8. Un enrasador metálico de borde recto, afilado y resistente, cuya longitud sea superior al diámetro del molde.
- 2.9. Un cuarteador.
- 2.10. Un mazo de goma y una paleta.
- 2.11. Una probeta graduada.
- 2.12. Un extractor de muestras si se emplea el molde de una sola pieza (opcional).

3. Preparación de la muestra

3.1. Se obtiene la fracción del suelo que pasa por el tamiz 20 UNE, operando como se indica en la NLT-101/72 y particularmente en su apartado 3.4.4. Se pesa el material retenido en dicho tamiz y se determina el tanto por ciento que representa respecto al peso total de la muestra.

3.2. Se cuarteo la fracción obtenida en porciones aproximadamente iguales (de unos 2,5 kg), para aplicar el procedimiento que a continuación se detalla.

4. Procedimiento

4.1. Se tara el molde con su base y sin el collar superior.

4.2. Se toma una de las porciones del suelo obtenidas según 3.2, y se mezcla con el agua que se estime necesaria, (véase apartado 6.4) hasta que quede íntima y uniformemente distribuida.

4.3. El suelo así preparado, se compacta en el molde, con el collar colocado, y en tres capas aproximadamente iguales. Para ello se aplicarán 26 golpes a cada capa, distribuidos uniformemente sobre la superficie, con la maza y altura de caída indicada en el apartado 2.2. La última capa compactada deberá sobrepasar el borde del molde, pero sin penetrar en el collar más de 1 cm.

Durante la compactación debe colocarse el molde sobre una base que proporcione un apoyo uniforme y con rigidez suficiente para que no amortigüe excesivamente los golpes. (Por ejemplo, un bloque de hormigón de unos 100 kg).

4.4. Terminada la compactación, se quita el collar y se enrasa cuidadosamente el suelo con el borde del molde.

4.5. Se pesa el conjunto del molde y suelo compactado.

4.6. Se extrae el material del molde, se divide en dos partes por el eje del cilindro y se toma una muestra representativa para determinar la humedad según NLT-102. La cantidad mínima de muestra será de 100 g. o más, como se especifica en la citada Norma, según el tamaño máximo de las partículas.

4.7. Se repiten las operaciones anteriores con nuevas porciones de material de las obtenidas en 3.2, utilizando diferentes proporciones de agua, hasta obtener los puntos necesarios para determinar la curva que relaciona la densidad seca con la humedad (véase apartado 6.5).

5. Resultados

5.1. Siguiendo la secuencia de operaciones señaladas en el impreso que se adjunta se calcula la densidad seca y la humedad correspondiente a cada determinación efectuada. En un gráfico que tenga por abscisas los tantos por ciento de humedad y por ordenadas las densidades secas, se sitúan los puntos definidos por los valores calculados. Con estos puntos se dibuja una curva suave. Las coordenadas del máximo de esta curva definen la «densidad máxima» y la «humedad óptima» del ensayo Proctor.

6. Observaciones

6.1. Apartado 2.1. También se puede utilizar, con resultados prácticamente iguales, el molde descrito en la norma NLT—108/76 sobre el ensayo de Apisonado Proctor Modificado (152,4 mm de diámetro), aplicando la misma energía de compactación por unidad de volumen, que para un valor normal de la aceleración de la gravedad, vale $0,583 \text{ J/cm}^3$.

Para obtener esta energía, utilizando el molde del Proctor Modificado, se llena en tres tongadas y se apisona cada una de ellas con la maza descrita en la presente Norma, pero aplicando 60 golpes por tongada en lugar de 26.

Estas condiciones se harán constar en el informe.

6.2. Apartado 3.2. Cuando hayan de compararse los resultados de este ensayo con los de otros que incluyan el material grueso, (retenido por el tamiz 20 UNE), como puede suceder en el ensayo de densidad «in situ», deberá efectuarse la corrección oportuna para tener en cuenta el efecto de dicho material grueso.

Si interesa mantener la misma proporción de gruesos que en la muestra original (como puede suceder si se va a realizar el ensayo CBR con sustitución de material), se sustituirán los retenidos en el tamiz 20 UNE por una proporción igual de material comprendido entre los tamices 5 y 20 UNE, obtenida tamizando otra porción de la muestra. La operación efectuada se hará constar en el informe para una adecuada interpretación de los resultados.

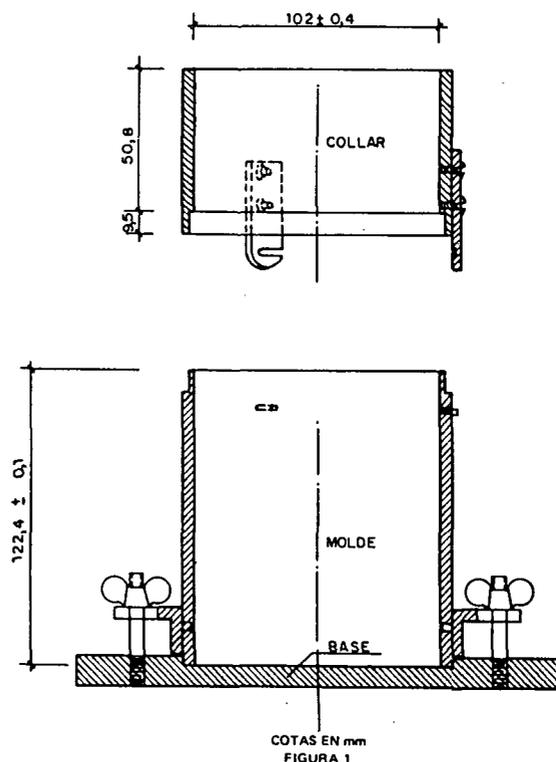
6.3. Apartado 3.2. Se puede admitir la reutilización del material, es decir, emplear el mismo suelo para obtener varios

puntos de la curva de compactación, excepto cuando las partículas sean frágiles o si se trata de arcilla muy plástica. Esta circunstancia deberá hacerse constar en el informe.

6.4. Apartado 4.2. Algunos suelos arcillosos presentan gran dificultad para mezclarse íntimamente con el agua de forma rápida. En estos casos puede ser conveniente añadir agua hasta obtener una humedad menor que la definitiva; se hace entonces un primer amasado y se deja la mezcla en reposo durante uno o dos días convenientemente protegida contra la desecación; después de este período se añade el resto del agua y se amasa de nuevo hasta que quede íntima y uniformemente distribuida.

6.5. Apartados 4.2. y 4.7. Generalmente, tres puntos en la rama ascendente y otros dos en la descendente son suficientes para definir la curva. No obstante, se prepara muestra para algún punto más por si fuera necesario.

Suele ser recomendable comenzar por la determinación correspondiente a la humedad menor, y continuar aumentando ésta con intervalos comprendidos entre el 1 por ciento y el 3 por ciento de humedad, según se trate de suelos arenosos o arcillosos. Cuando al aumentar el contenido de agua de un punto al siguiente decrece o se mantiene el peso húmedo del suelo, se sabe que se está trabajando en la rama descendente de la curva de densidades secas.



TRABAJO N.º DENOMINACION MUESTRA N.º

ENSAYO PROCTOR } NORMAL
 MODIFICADO

Molde: N.º de capas: Material utilizado:

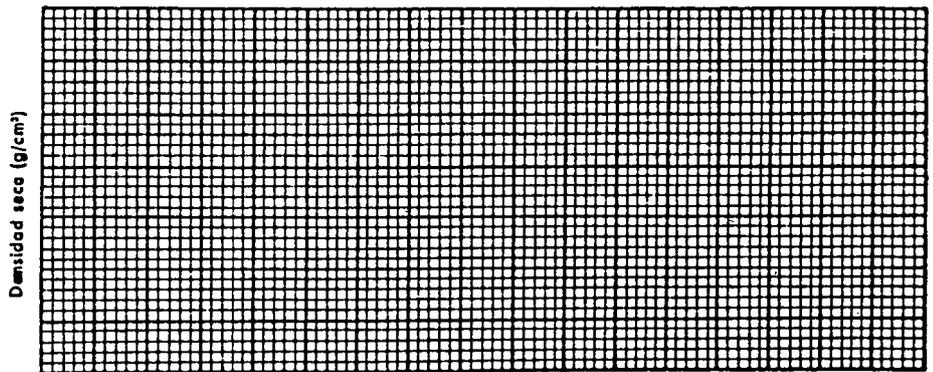
Maza: N.º de golpes por capa: % de material no utilizado:

Altura de caída: Peso específico del material grueso:

| | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------|--|--|--|--|--|--|
| Densidad | — | Punto n.º | | | | | | |
| | — | % agua añadida | | | | | | |
| | t + s + a | Molde + suelo + agua | | | | | | |
| | t | Molde | | | | | | |
| | $s + a = (t + s + a) - t$ | Suelo + agua | | | | | | |
| | $s = \frac{(s + a) 100}{100 + w}$ | Suelo | | | | | | |
| Humedad | $\rho = \frac{s}{V}$ | Densidad | | | | | | |
| | — | Referencia tara | | | | | | |
| | t + s + a | Tara + suelo + agua | | | | | | |
| | t + s | Tara + suelo | | | | | | |
| | t | Tara | | | | | | |
| | $s = (t + s) - t$ | Suelo | | | | | | |
| | $a = (t + s + a) - (t + s)$ | Agua | | | | | | |
| $w = \frac{a}{s} \times 100$ | Humedad % | | | | | | | |

DENSIDAD MAXIMA

HUMEDAD OPTIMA



Densidad seca (g/cm³)

Humedad

Descripción del suelo y observaciones

.....

**Apisonado proctor
modificado
NLT-108/76**

1. Objeto.

1.1. El ensayo de Apisonado Proctor Modificado tiene por objeto determinar en un suelo la relación entre la humedad y la densidad seca obtenida cuando es compactado en las condiciones establecidas en esta Norma.

2. Aparatos y materiales necesarios.

2.1. Un molde cilíndrico de metal de $2.320 \pm 25 \text{ cm}^3$ de capacidad ($152,4 \pm 0,7 \text{ mm}$ de diámetro interior y $127 \pm 0,1 \text{ mm}$ de altura), con su base y collar (fig. 1). El molde puede ser de una pieza, como el de la figura, o partido longitudinalmente para desmoldear con mayor facilidad. También puede emplearse un molde como el del ensayo CBR, de mayor altura, provisto de un disco en el fondo para respetar las dimensiones interiores indicadas.

2.2. Una maza metálica de base circular de $4,535 \pm 0,01 \text{ kg}$ adaptada al interior de una guía tubular adecuada para que su altura de caída libre sea de $457 \pm 2 \text{ mm}$. La base de la maza tendrá un diámetro de $50 \pm 0,2 \text{ mm}$. La guía debe tener, a dos centímetros de cada extremo, 4 orificios de 1 cm de diámetro espaciados 90° para facilitar la entrada o salida del aire. La separación entre maza y guía debe ser la suficiente para que la caída sea libre.

También se puede utilizar una maza automática que distribuya los golpes uniformemente sobre la superficie del material. Sin embargo, sólo se considerarán aceptables aquellos modelos con los que se haya comprobado experimentalmente que los resultados obtenidos son los mismos, a los efectos prácticos perseguidos, que con la maza manual. La utilización de una maza diferente a la manual normalizada deberá hacerse constar en la hoja de resultado.

2.3. Una balanza de unos 20 kg y otra de unos 1.000 g de capacidad, cuyo error en la pesada sea inferior a 1 g y $0,1 \text{ g}$ respectivamente.

2.4. Recipientes adecuados para la determinación de humedad, como se indica en el apartado 2.3 de la Norma NLT-102/72.

2.5. Una estufa de desecación regulable a $105\text{-}110 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.6. Una amasadora mecánica adecuada, o instrumentos diversos para amasar manualmente (recipiente, guantes de goma, etc.).

2.7. Un tamiz 20 UNE (A.S.T.M. $3/4$ pulgada) y otro 5 UNE (A.S.T.M. núm. 4).

2.8. Un enrasador metálico de borde recto, afilado y resistente, cuya longitud sea superior al diámetro del molde.

- 2.9. Un cuarteador.
- 2.10. Un mazo de goma y una paleta
- 2.11. Una probeta graduada.
- 2.12. Un extractor de muestras si se emplea el molde de una sola pieza (opcional).

3. Preparación de la muestra.

3.1. Se obtiene la fracción del suelo que pasa por el tamiz 20 UNE, operando como se indica en la NLT-101/72 y particularmente en su apartado 3.4.4.

Se pesa el material retenido en dicho tamiz y se determina el tanto por ciento que representa respecto al peso total de la muestra.

3.2. Se cuartea la fracción obtenida en porciones aproximadamente iguales (de unos 5 kg), para aplicar el procedimiento que a continuación se detalla.

4. Procedimiento.

4.1. Se tara el molde con su base y sin el collar superior.

4.2. Se toma una de las porciones del suelo obtenidas según 3.2, y se mezcla con el agua que se estime necesaria (véase ap. 6.4.), hasta que quede íntima y uniformemente distribuida.

4.3. El suelo así preparado, se compacta en el molde, con el collar colocado, y en cinco capas aproximadamente iguales. Para ello se aplicarán 60 golpes a cada capa, distribuidos uniformemente sobre la superficie, con la maza y altura de caída indicada en el apartado 2.2. La última capa compactada deberá sobrepasar el borde del molde, pero sin penetrar en el collar más de 1 cm.

Durante la compactación debe colocarse el molde sobre un base que proporcione un apoyo uniforme y con rigidez suficiente para que no amortigüe excesivamente los golpes (por ejemplo, un bloque de hormigón de unos 100 kg).

4.4. Terminada la compactación, se quita el collar y se enrasa cuidadosamente el suelo con el borde del molde.

4.5. Se pesa el conjunto del molde y suelo compactado.

4.6. Se extrae el material del molde, se divide en dos partes por el eje del cilindro y se toma una muestra representativa para determinar la humedad, según NLT-102. La cantidad mínima de muestra será de 100 g. o más, como se especifica en la citada Norma, según el tamaño máximo de las partículas.

4.7. Se repiten las operaciones anteriores con nuevas porciones de material de las obtenidas en 3.2, utilizando diferen-

tes proporciones de agua, hasta obtener los puntos necesarios para determinar la curva que relaciona la densidad seca con la humedad (véase apartado 6.5.).

5. Resultados

5.1. Siguiendo la secuencia de operaciones señaladas en el impreso que se adjunta, se calcula la densidad seca y la humedad correspondiente a cada determinación efectuada. En un gráfico que tenga por abscisas los tantos por ciento de humedad y por ordenadas las densidades secas, se sitúan los puntos definidos por los valores calculados. Con estos puntos se dibuja una curva suave. Las coordenadas del máximo de esta curva definen la «densidad máxima» y la «humedad óptima» del ensayo Proctor.

6. Observaciones.

6.1. Apartado 2.1. También se puede utilizar, con resultados prácticamente iguales, el molde descrito en la Norma NLT-107/76 sobre el ensayo de Apisonado Proctor (102 mm de diámetro), aplicando la misma energía de compactación por unidad de volumen, que para un valor normal de la aceleración de la gravedad, vale $2,632 \text{ J/cm}^3$.

Para obtener esta energía, utilizando el molde del Ensayo Proctor, se llena en cinco tongadas y se apisona cada una de ellas con la masa descrita en la presente Norma, pero aplicando 26 golpes por tongada en lugar de 60.

Estas condiciones se harán constar en el informe.

6.2. Apartado 3.1. Cuando hayan de compararse los resultados de este ensayo con los de otros que incluyan el material grueso, (retenido por el tamiz 20 UNE), como puede suceder en el ensayo de densidad «in situ», deberá efectuarse la corrección oportuna para tener en cuenta el efecto de dicho material grueso.

Si interesa mantener la misma proporción de gruesos que en la muestra original (como puede suceder si se va a realizar el ensayo CBR con sustitución de material), se sustituirán los retenidos en el tamiz 20 UNE por una proporción igual de material comprendido entre los tamices 5 y 20 UNE, obtenida tamizando otra porción de la muestra. La operación efectuada se hará constar en el informe para una adecuada interpretación de los resultados.

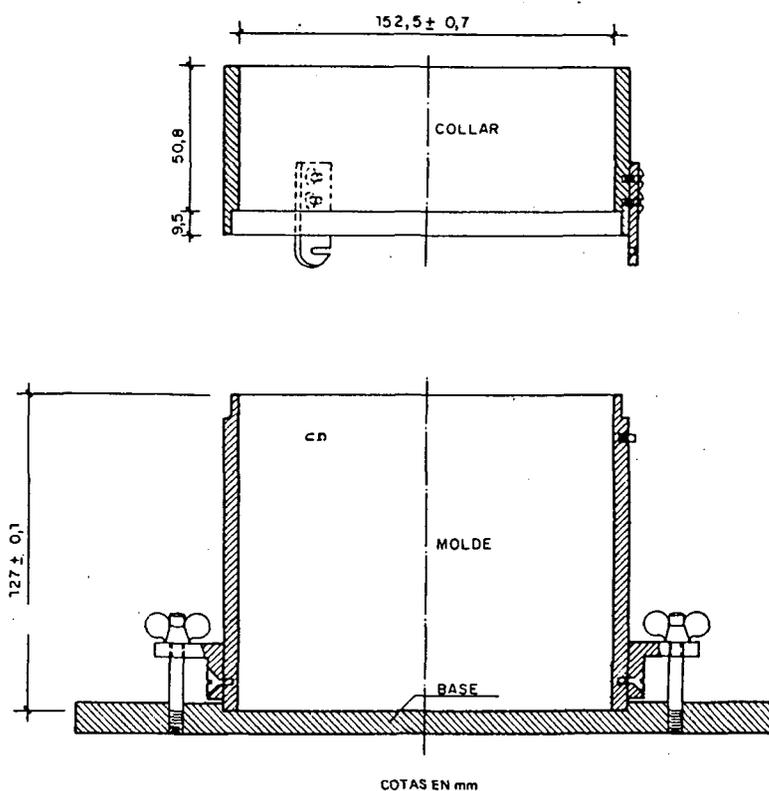
6.3. Apartado 3.2. Se puede admitir la reutilización del material, es decir, emplear el mismo suelo para obtener varios puntos de la curva de compactación, excepto cuando las par-

tículas sean frágiles o si se trata de arcilla muy plástica. Esta circunstancia deberá hacerse constar en el informe.

6.4. Apartado 4.2. Algunos suelos arcillosos presentan gran dificultad para mezclarse íntimamente con el agua de forma rápida. En estos casos puede ser conveniente añadir agua hasta obtener una humedad menor que la definitiva; se hace entonces un primer amasado y se deja la mezcla en reposo durante uno o dos días convenientemente protegida contra la desecación; después de este período se añade el resto del agua y se amasa de nuevo hasta que quede íntima y uniformemente distribuida.

6.5. Apartados 4.2. y 4.7. Generalmente, tres puntos en la rama ascendente y otros dos en la descendente son suficientes para definir la curva. No obstante, se prepara muestra para algún punto más por si fuera necesario.

Suele ser recomendable comenzar por la determinación correspondiente a la humedad menor, y continuar aumentando ésta con intervalos comprendidos entre el 1 por ciento y el 3 por ciento de humedad, según se trate de suelos arenosos o arcillosos. Cuando al aumentar el contenido de agua de un punto al siguiente decrece o se mantiene el peso húmedo del suelo, se sabe que se está trabajando en la rama descendente de la curva de densidades secas.



**Densidad in situ
por el método
de la arena
NLT-109/72**

1. Objeto.

1.1. El objeto de este ensayo es determinar la densidad *in situ* de un suelo que no contenga partículas de más de 5 cm, midiendo su volumen mediante una arena calibrada.

2. Aparatos y material necesarios.

2.1. Un recipiente especial con válvula y embudo que tenga aproximadamente las dimensiones señaladas en la figura 1. En especial el diámetro del orificio de la válvula cilíndrica debe ser de 13 mm.

2.2. Balanza de unos 10 kg de capacidad que aprecie 1 g.

2.3. Estufa de desecación, regulable a 105-110 °C.

2.4. Bote o frasco de 3,5 dm³ de capacidad aproximadamente.

2.5. Herramientas para practicar el hoyo, adecuadas al terreno de que se trate (paleta, cucharón, martillo, cincel, etc.).

2.6. Lona de aproximadamente 40 X 40 cm, con un agujero en el centro de unos 12 cm de diámetro.

2.7. Tamiz 50 UNE (A.S.T.M. 2 pulgadas).

2.8. Arena de tamaño uniforme, limpia y seca.

3. Procedimiento

3.1. Tarado del recipiente.

3.1.1. Se parafinan todas las juntas del cuerpo del recipiente.

3.1.2. Se pesa el recipiente parafinado.

3.1.3. Se llena de agua hasta la parte superior de la válvula.

3.1.4. Se pesa el recipiente lleno de agua.

3.2. Excavación del hoyo.

3.2.1. Se alisa la superficie del terreno donde se quiere hacer la determinación, en un círculo de aproximadamente 30 cm de diámetro.

3.2.2. Se pone la lona sobre la zona alisada, para poder recuperar el material que se caiga durante la excavación del hoyo.

3.2.3. Se practica un hoyo cilíndrico de aproximadamente 12 cm de diámetro y de 12 a 18 cm de profundidad.

3.2.4. Se retira y guarda en un bote todo el material excavado. Si se desea también hallar la humedad *in situ* se pesa dicho material con su humedad natural, o bien se toma una muestra más pequeña para humedad.

3.2.5. Se deseca el material extraído, poniéndolo en estufa a 105-110 °C hasta peso constante y se anota su masa.

3.3. Medición del volumen del hoyo.

3.3.1. Se llena el recipiente-embudo, bien limpio y seco, con la arena de tamaño uniforme, hasta la válvula. Esta operación debe hacerse con cuidado de no mover o golpear el recipiente.

3.3.2. Se pesa el recipiente lleno de arena.

3.3.3. Con la válvula cerrada, se coloca el recipiente sobre el hoyo invertido y centrado.

3.3.4. Se abre la válvula. La arena caerá desde la válvula hasta llenar el hoyo y el embudo.

3.3.5. Cuando deje de caer arena, se cierra la válvula.

3.3.6. Se pesa el recipiente con la arena sobrante.

3.3.7. Se coloca el recipiente invertido sobre una superficie plana. Se abre la válvula y se cierra cuando se haya llenado el embudo.

3.3.8. Se retira el recipiente y se pesa la arena que cabe en el embudo.

4. Resultados.

4.1. De la operación de tarado se obtienen la masa de la arena y el volumen del agua que corresponden al volumen del recipiente; de estos datos se calcula la densidad de la arena dividiendo la primera por el segundo.

4.2. La densidad *in situ* se obtiene dividiendo la masa seca de la tierra extraída por el volumen del hoyo. Este se calcula a partir de la densidad de la arena y de la masa de la que cabe en el hoyo.

5. Observaciones.

5.1. Apartado 2.8. La arena que se emplea en este ensayo debe ser de tamaño uniforme. Debe pasar toda por el tamiz 2 UNE (A.S.T.M. núm. 10) y quedar retenida en el 0,25 UNE (A.S.T.M. núm. 60). Es muy importante que esté bien seca y limpia. Sirve a ese fin la «arena normal del Manzanares para morteros» utilizada en ensayos de morteros de cemento y que se puede adquirir ya tamizada. Su granulometría está prácticamente comprendida entre los tamices 1,25 UNE (A.S.T.M. núm. 16) y 0,63 UNE (A.S.T.M. núm. 30). La arena ya utilizada sirve de nuevo siempre que haya seguridad de que no se ha ensuciado.

5.2. Apartado 3.2. Debe efectuarse la excavación del hoyo con cuidado para evitar comprimir el suelo en sus paredes.

Antes de rellenarlo con arena, debe quitarse escrupulosamente todo el material suelto.

5.3. Apartado 3.3. Durante las operaciones de llenado del recipiente y vaciado sobre el hoyo, debe cuidarse que no sufra el recipiente ningún golpe ni vibración, pues compactaría la arena arbitrariamente, haciendo variar notablemente los resultados.

5.4. Si el suelo contuviera piedras demasiado gruesas, es necesario practicar un hoyo de mayores dimensiones. Como orientación se da la siguiente tabla:

| Tamaño máximo de la piedra (mm) | Diámetro del hoyo (cm) |
|------------------------------------|---------------------------|
| 20 | 10 |
| 40 | 15 |
| 70 | 20 |

La profundidad del hoyo debe ser igual o mayor que su diámetro, con objeto de diluir los posibles errores en el enrase de la arena.

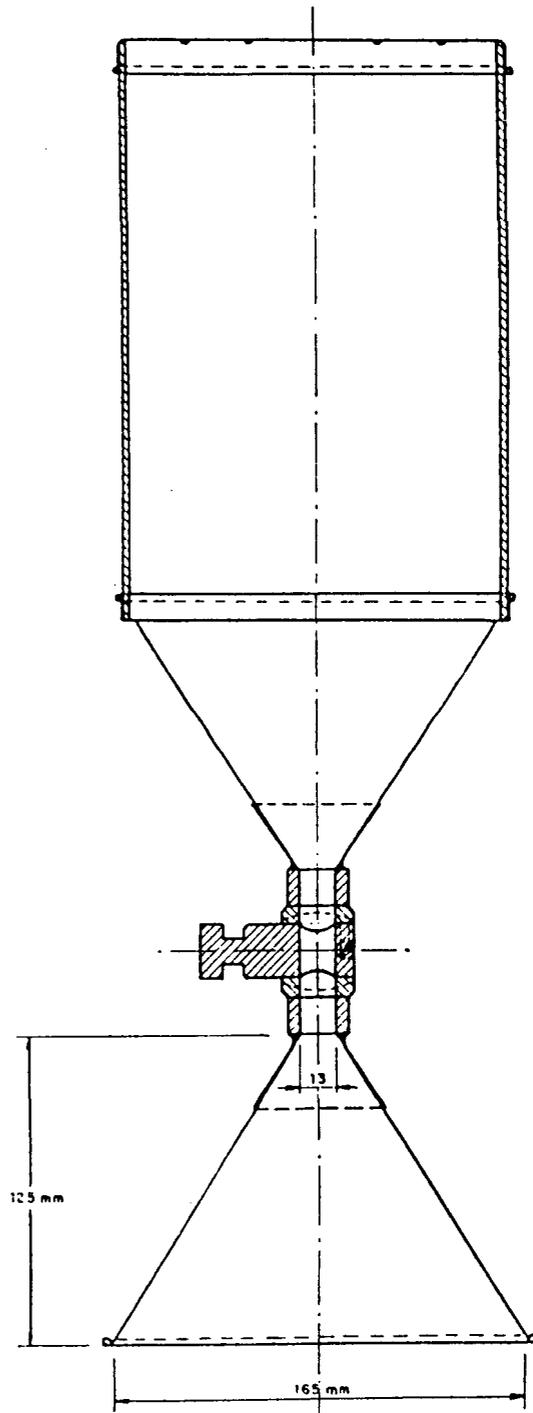
Cuando el volumen del hoyo sea mayor que el del frasco no se puede utilizar éste. En su lugar puede emplearse un recipiente cualquiera (una simple lata) de dimensiones ligeramente superiores a las del hoyo. Para determinar su volumen se pesa vacía y llena de agua, y se restan los resultados.

Al echar la arena de la lata al agujero, debe hacerse de la misma forma seguida al llenar la lata para determinar la densidad de la arena. Con este fin suelen llenarse la lata y el agujero por medio de un embudo, manteniendo su extremo a una distancia aproximadamente constante con respecto a la superficie de la arena.

Otra modificación al procedimiento general, en este caso, consiste en colocar en el lugar donde se va a realizar el ensayo, en vez de la lona citada en el apartado 3.2.2 una tabla bien plana, de 30 X 30 cm de superficie de 1 a 2 cm de espesor y con un agujero central de diámetro aproximadamente igual al del hoyo que se va a practicar. El hoyo se hace coincidiendo con el agujero de la tabla, y al verter la arena se enrasa sobre ésta. Para calcular el volumen del hoyo, se resta del total determinado por medio de la arena el correspondiente al agujero de la tabla previamente calculado a partir de sus dimensiones. También puede precisarse un orificio de mayores dimensiones cuando se desea hallar la densidad correspondiente a la totalidad de una capa compactada y el espesor de ésta es grande.

5.5. Cuando los resultados se necesitan con urgencia se

procede en todo según el método general, excepto que para obtener el peso del suelo seco se determina la humedad por el método del alcohol o análogo.



Aparato de densidad.

Densidad «in situ» método de la arena

Fecha: Operador: Revisado:

Cuadro de resultados

| Muestra n.º | Localización | Laboratorio | | Obra | | Observaciones |
|-------------|--------------|---------------|----------------------|----------------|----------|---------------|
| | | Humed. óptima | Densid. máxima g/cm³ | Densidad g/cm³ | Humed. % | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Operaciones de tarado

| | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|--|--|--|--|
| — | Referencia del recipiente | | | | |
| t + a | Recipiente lleno de agua | | | | |
| t | Recipiente vacío | | | | |
| $a = V \cdot (t + a) - t$ | Volumen del recipiente | | | | |
| $(t + a') (1)$ | Recipiente + arena | | | | |
| $a' = (t + a') - t$ | Arena | | | | |
| $\frac{1}{p} = \frac{V}{a}$ | Inverso densidad de arena | | | | |

(1) Como valor de t + a' se tomará la media de los pesos obtenidos en las determinaciones efectuadas, siempre que estén hechas con el mismo tipo de arena y en las mismas condiciones.

Densidad

| | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| — | N.º de muestra | | | | | | |
| — | Referencia recipiente | | | | | | |
| m_1 | Arena + recipiente antes del ensayo | | | | | | |
| m_2 | Arena + recipiente después del ensayo | | | | | | |
| $a'_1 + a'_2 = m_1 - m_2$ | Arena hoyo + arena embudo | | | | | | |
| a'_2 | Masa arena embudo | | | | | | |
| $a'_1 = (a'_1 + a'_2) - a'_2$ | Masa arena hoyo | | | | | | |
| $\frac{1}{\rho}$ | Inverso densidad arena | | | | | | |
| $V = a'_1 \cdot \frac{1}{\rho}$ | Volumen hoyo | | | | | | |
| $\rho_d = \frac{s}{V}$ | Densidad seca | | | | | | |

Humedad

| | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------|--|--|--|--|--|--|
| — | Referencia tara | | | | | | |
| $t + s + a$ | Tara + suelo + agua | | | | | | |
| $t + s$ | Tara + suelo | | | | | | |
| t | Tara | | | | | | |
| $a = (t + s + a) - (t + s)$ | Agua | | | | | | |
| $s = (t + s) - t$ | Suelo | | | | | | |
| $w = \frac{a}{s} \times 100$ | % Humedad | | | | | | |

Observaciones:

.....

.....

.....

.....

.....

D. TEST DE WILCOXON APLICADO AL CONTROL DE COMPACTACION

Test de Wilcoxon (Comparación de dos muestras) aplicado al control de compactación

Se trata de comparar una muestra de n medidas de compactación efectuadas durante la construcción —«población a controlar»— con la muestra de m resultados obtenidos en los tramos de prueba iniciales y adoptados como «población de referencia»

El objeto del Test es estimar si los resultados obtenidos en la muestra de control son, con un nivel de fiabilidad del 95%, más bajos que los obtenidos en la muestra de referencia.

El test de Wilcoxon consiste en:

a) Clasificar por valores crecientes los $m+n$ resultados de densidades, sin distinción de origen.

b) Asignar a cada elemento de la serie un valor igual al del rango que ocupa dentro de la clasificación.

c) Calcular la suma de los rangos de los n valores de la muestra de control.

d) Comparar esta suma al valor del «umbral crítico» correspondiente, tomado de la Tabla adjunta, al entrar en ella con los valores de m y n . Sólo en el caso de que la suma resulte inferior al «umbral crítico» hallado, puede afirmarse que las medidas de compactación de la «población a controlar» son significativamente más bajas (con un nivel del 95 % de confianza) a las obtenidas como referencia.

Observación. Si en la serie de $m + n$ densidades hay varios valores iguales, se asigna a cada uno un rango ficticio igual a la media de los que les correspondería en la clasificación si hubieran sido ligeramente diferentes entre sí.

TABLA DE UMBRALES CRITICOS DE LA SUMA DE RANGOS DE LA MUESTRA DE CONTROL

| m \ n | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|-------|----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| 20 | 41 | 117 | 220 | 349 | 503 | 682 | 887 | 1115 | 1369 | 1648 |
| 30 | 55 | 152 | 276 | 426 | 602 | 803 | 1030 | 1282 | 1557 | 1859 |
| 40 | 68 | 187 | 333 | 505 | 703 | 926 | 1174 | 1449 | 1748 | 2072 |
| 50 | 83 | 222 | 389 | 583 | 803 | 1049 | 1320 | 1617 | 1938 | 2284 |

Aplicación numérica del Test de Wilcoxon*

—Población de referencia.

Muestra de $m = 30$ valores de densidad obtenidos en los ensayos de referencia:

| | | | | |
|------|------|------|------|------|
| 2,06 | 2,09 | 2,11 | 2,12 | 2,15 |
| 2,07 | 2,09 | 2,11 | 2,12 | 2,15 |
| 2,07 | 2,10 | 2,12 | 2,12 | 2,17 |
| 2,08 | 2,10 | 2,12 | 2,13 | 2,19 |
| 2,08 | 2,10 | 2,12 | 2,14 | 2,20 |
| 2,09 | 2,10 | 2,12 | 2,13 | 2,20 |

—Población a controlar.

Muestra de $n = 15$ valores de densidad obtenidos en los ensayos de control:

| | | | | |
|------|------|------|------|------|
| 2,03 | 2,08 | 2,07 | 2,08 | 2,08 |
| 2,05 | 2,12 | 2,06 | 2,08 | 2,11 |
| 2,16 | 2,08 | 2,13 | 2,16 | 2,14 |

—Valor del umbral crítico

Entrando en la Tabla con los valores $m = 30$ y $n = 15$, se obtiene un umbral igual a 276.

—Comparación con el umbral crítico.

Clasificados los 45 valores de densidad por orden creciente, en el Cuadro que figura a continuación, se deduce que la suma de los rangos correspondiente a la muestra de control es igual a 269, inferior al umbral crítico.

En conclusión, el resultado del control es significativamente inferior al de la referencia.

* Adaptado de: «Guide pour le contrôle du compactage» - SETRA. LCPC.

| Numeración de los m+n valores | Clasificación | | Rango de los m + n valores | Rango de los n valores |
|-------------------------------|---------------|-----------|----------------------------|------------------------|
| | m valores | n valores | | |
| 1 | | 2,03 | 1 | 1 |
| 2 | | 2,05 | 2 | 2 |
| 3 | | 2,06 | 3,5 | 3,5 |
| 4 | 2,06 | | 3,5 | |
| 5 | | 2,07 | 6 | 6 |
| 6 | 2,07 | | 6 | |
| 7 | 2,07 | | 6 | |
| 8 | | 2,08 | 11 | 11 |
| 9 | | 2,08 | 11 | 11 |
| 10 | | 2,08 | 11 | 11 |
| 11 | | 2,08 | 11 | 11 |
| 12 | | 2,08 | 11 | 11 |
| 13 | 2,08 | | 11 | |
| 14 | 2,08 | | 11 | |
| 15 | 2,09 | | 16 | |
| 16 | 2,09 | | 16 | |
| 17 | 2,09 | | 16 | |
| 18 | 2,10 | | 19,5 | |
| 19 | 2,10 | | 19,5 | |
| 20 | 2,10 | | 19,5 | |
| 21 | 2,10 | | 19,5 | |
| 22 | | 2,11 | 23 | 23 |
| 23 | 2,11 | | 23 | |
| 24 | 2,11 | | 23 | |
| 25 | | 2,12 | 28,5 | 28,5 |
| 26 | 2,12 | | 28,5 | |
| 27 | 2,12 | | 28,5 | |
| 28 | 2,12 | | 28,5 | |
| 29 | 2,12 | | 28,5 | |
| 30 | 2,12 | | 28,5 | |
| 31 | 2,12 | | 28,5 | |
| 32 | 2,12 | | 28,5 | |
| 33 | | 2,13 | 33,5 | 33,5 |
| 34 | 2,13 | | 33,5 | |
| 35 | | 2,14 | 35,5 | 35,5 |
| 36 | 2,14 | | 35,5 | |
| 37 | 2,15 | | 38 | |
| 38 | 2,15 | | 38 | |
| 39 | 2,15 | | 38 | |
| 40 | | 2,16 | 40,5 | 40,5 |
| 41 | | 2,16 | 40,5 | 40,5 |
| 42 | 2,17 | | 42 | |
| 43 | 2,19 | | 43 | |
| 44 | 2,20 | | 44,5 | |
| 45 | 2,20 | | 44,5 | |

Suma de los rangos de los n valores: 269,0

E. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Highway Research Board. Bulletin 272. Factors that influence field compaction of soils. Washington 1960.
2. Road Research Laboratory. Mecánica del Suelo para Ingeniero de Carreteras y Aeropuertos. Madrid 1963.
3. Arquíé, Georges. Le compactage, Routes et Pistes. París 1970.
4. LCPC. Bulletin de Liaison, n.º 72. Le choix des modalités de compactage des remblais. Le flaive, Morel, Chaigne, Quibel. París 1974.
5. LCPC. Contrôle de Qualité en construction routière. París 1975.
6. SETRA. Recommendation pour les terrassements routiers. París 1976.
7. Highway Research Board. Compendium 10. Compaction of Roadway Soils. Washington 1979.
8. Transportation Research Board. Synthesis of Highway Practice 65. Quality Assurance. Washington 1979.
9. Transportation Research Institute. Compaction Requirement for Flexible Pavement Structures. Livneh, Ishai, Uzan, Israel 1979.
10. LCPC. Colloque International sur le compactage. París 1980.
 - Modèles mathématiques dans le domaine du compactage par vibration. Machet et Sanejouand.
 - Le comportement vibratoire: trait d'union entre le choix des paramètres et l'efficacité d'un rouleau vibrant. Quibel.
 - L'importance de l'épaisseur des couches dans le compactage des remblais. Leflaive et Schaeffner.
 - Influence des paramètres d'un rouleau vibrant sur son efficacité. Quibel et Froumentin.
11. Dirección General de Carreteras. Terraplenes y Pedraplenes. V. Escario. Madrid, 1981.
12. Preiss, Kenneth. The nuclear method of measuring density and water content of compacted layers of soil. Israel 1982.
13. LCPC. Symposium Routes et Développement. París 1984.
 - Optimization du fonctionnement des compacteurs vibrants. Albaret. S.A.
14. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Jornadas sobre compactación de suelos, Santander 1984.
 - Control de compactación. López Corral.
15. Lebrero. Introducción a la compactación vibratoria. Fernández Castellá, Fernández Montes, Zaragoza 1986.

